


# 独 创 性 声 明

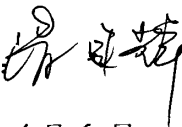

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津工业大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名  签字日期 2016 年 1 月 14 日

# 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津工业大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津工业大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名  导师签名:   
签字日期 2016 年 1 月 14 日 签字日期: 2016 年 1 月 14 日



Y2986444

## 学位论文的主要创新点

一、本文基于集装箱码头系统的服务特性，为提高集装箱码头岸边资源利用效率，构建连续型泊位动态配置与岸桥分配数量关系的双目标优化模型，可为集装箱码头岸边资源动态配置优化提供理论基础。

二、综合考虑集装箱港口的实际情况，构建连续型泊位分配与岸桥调度动态联合调度优化模型，为港口岸边资源利用的整体优化提供新方法。

三、构建集装箱码头泊位与岸桥动态联合调度模型，并利用加入自适应机制的多目标遗传算法对模型进行求解，为集装箱码头管理者对码头岸边资源进行管理提供新思路、新想法。

## 摘要

伴随着全球一体化的发展，制造业的回归，互联网及全球化的发展，物流业发展出现了井喷之势。港口作为物流环节的重要组成部分，发挥着重要作用。随着集装箱运输的广泛发展和高速增长，码头到港船舶也呈高速增长态势，这使得一些集装箱码头资源配置问题越来越明显，出现了一些船舶在港滞留等一系列问题。如何对港口现有岸边资源进行合理配置，减少码头资源的浪费，提高船舶在港装卸效率逐渐成为港口管理者首要考虑的问题。在码头资源一定的情况下，对岸边资源进行合理的调配使资源发挥最大的作用。

首先，文章对集装箱码头的布局、特点以及集装箱码头船舶进港进行装卸的作业流程进行介绍，结合港口的实际情况，对码头岸边资源的实际调度情况有了深刻认识。文中主要通过对实际情况集装箱码头泊位的分配和岸桥的调度问题研究，并通过对调度过程中涉及到的影响因素描述及分析，并结合集装箱码头的情况，提出了两个优化目标函数的多目标优化模型。对以往的研究中只考虑船舶在港时间最小的目标进行分析，文中列出了以船舶在港停留时间最小的目标函数和船舶进行装卸服务时产生的泊位运营费用和岸桥移动费用最小的目标双目标函数。

其次，文中对遗传算法的相关知识进行概述，并对遗传算法的原理和流程进行介绍，对多目标优化问题用遗传算法实现的具体方法进行论述。

最后，设计集装箱码头泊位分配和岸桥调度多目标遗传算法的具体实现过程。并针对一个具体案例，运行多目标遗传算法，验证其有效性。通过本文的研究，以期为码头管理者对港口岸边资源进行配置时提供参考，同时也希望能为后续港口岸边资源配置研究提供新的思路 and 想法。

**关键词：**连续型泊位分配；岸桥调度；流程优化；联合调度；多目标遗传算法

## ABSTRACT

With the development of global integration and the return of the manufacturing industry and the development of Internet and globalization, the logistics industry to get fast development. Port as an important part of the logistics links plays an important role. With the rapid development of container transportation, the number of ship to the port is a high-speed growth. This makes some container terminal resource allocation problem is more and more obvious. There have been a series of problems. Such as some ship stranded in Port. How to rational allocation of the port resources and reduce the waste port resources and improve the efficiency of ship handling has gradually become the problem of port management priority. They need to reasonable allocate resources, making full use of resources.

First of all, making introductions of the layout and characteristic of container terminal and the loading and unloading process of ship. Combined with actual situation of terminal. Having a deep understanding of the container terminal's actual scheduling. In this paper, through the study of the container terminal berth allocation and gantry cranes scheduling problem and the analysis of berth allocation and gantry cranes scheduling involves the related influence factors. Put forward the two optimization model of multi-objective optimization objective function. In previous studies, they only analyze the goal function of the time that ships in the port. In this paper, I list two objective functions that the shipping time of ships in port and minimize of the sum cost in berths operating costs and gantry cranes mobile fees.

Secondly, this paper describes the relevant knowledge of genetic algorithm, and introduces the principle and process of genetic algorithm, and describes multi-objective optimization problem used genetic algorithm implementation of specific methods.

Finally, in this paper, I design the concrete implementation process of container terminal berth allocation and gantry cranes scheduling multi-objective genetic algorithm. Then with a specific case, run the multi-objective genetic algorithm, verify its validity. Through the study of this article, in order to help terminal managers to make decision in the port shore resources configuration. I also hope this paper can provide new thought and ideas for the subsequent port shore resource allocation research.

**Key words:** Continuous berth allocation; Gantry cranes scheduling; Process optimization Joint scheduling; Multi-objective 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 国内外研究现状综述.....	2
1.2.1 港口资源调度研究现状.....	2
1.1.2 多目标优化研究现状.....	5
1.3 本文主要内容.....	7
第 2 章 集装箱码头作业流程及特点.....	9
2.1 码头功能发展历程.....	9
2.2 码头作业流程介绍.....	10
2.3 集装箱码头作业流程特点.....	12
第 3 章 泊位-岸桥协调调度数学模型.....	15
3.1 泊位-岸桥协调调度研究及问题描述.....	15
3.2 数学模型.....	16
3.2.1 泊位分配与岸桥调度基于的假设.....	16
3.2.2 模型建立.....	17
3.2.3 目标函数.....	18
3.3 约束条件.....	19
3.4 模型优化方法的选择.....	20
3.4.1 传统的多目标优化算法.....	20
3.4.2 智能优化算法.....	21
3.4.3 多种方法对比分析.....	23
第 4 章 泊位与岸桥协调调度模型求解.....	25
4.1 多目标遗传算法相关理论.....	25
4.1.1 遗传算法.....	25
4.1.2 多目标遗传算法相关释义.....	28
4.2 多目标遗传算法选择方法.....	28
4.3 多目标遗传算法的准备.....	32
4.3.1 个体编码.....	32
4.3.2 种群初始化.....	32

4.3.3 适应度函数的确定.....	33
4.3.4 选择.....	33
4.3.5 交叉.....	35
4.3.6 变异.....	35
4.3.7 算法流程图.....	37
4.3.8 优解保存策略.....	38
4.3.9 终止条件判断.....	38
第 5 章 算例分析.....	41
5.1 算例建模.....	41
5.1.1 基础数据.....	41
5.1.2 实例模型.....	42
5.2 算例求解.....	42
第 6 章 结论与展望.....	47
6.1 总结.....	47
6.2 展望.....	48
参考文献.....	49
发表论文和参加科研情况说明.....	53
致 谢.....	55

## 第一章 绪论

### 1.1 选题背景及研究意义

#### 1.1.1 选题背景

伴随着全球一体化的发展，随着制造业的回归，互联网及全球化的发展。国与国之间的贸易日益频繁，并呈现高速增长的趋势。同时，传统的资源开采、人力等领域利润日益萎缩。随着美国奥巴马政府把“美国制造”搬向历史舞台，德国提出“工业 4.0”，中国进一步提出了中国制造“2025”。世界各国均将制造业提高到国家战略的角度。制造业必将在整个世界回归。各行业竞争日益加剧，本土企业在本国产生的利润增速日益减少，各大型企业将自己的潜在客户源锁定在国外。各国之间的贸易变的更加频繁。国际物流对于现代制造型企业来说变得异常重要。

现今国际物流超过 80%是通过海上运输来完成的，因此，没有相对发达的海运业必将无法适应现代物流业的发展。到 20 世纪 80 年代，经济全球化格局已逐渐形成，物流运输费用相比于产品成本的比重也大大提高；所以，降低物流费用对提高产品在价格方面竞争力的作用日益明显，越来越多的生产者想方设法想要降低物流费用。

港口是国际物流运输中最重要的交通基础设施之一，作为国际物流运作中最重要的环节，是连接国内内陆运输、内河船舶运输以及远洋运输的枢纽，是国际物流贸易调度的重要环节。近年来，中国的港口运输在世界港口运输中占据重要的地位，其集装箱吞吐量已经连续多年稳居世界第一，连续多年稳步增多，正逐渐成为世界上港口集装箱吞吐量最多的国家。据上海航运交易所、上海国际航运信息中心联合发布的《2015 上半年水运形式分析报告》显示，2015 年上半年全球经济增长和贸易往来继续保持平稳态势。据统计，上半年全球集装箱运输量达 8890 万 TEU（国际标准箱单位），较之上年同期增长 8.2%。上半年我国规模以上港口集装箱吞吐量 10272.80 万 TEU，同比增长 6.1%，增速较上年回升 0.4 个百分点。节省优化国际航运物流费用对于我国稳步增长的国际贸易有至关重要的作用。基于海运在世界经济发展中的重要地位，相信随着全球一体化的发展，各国之间的海运贸易量也会越来越高。

在全球航运市场中，以中国、印度等为代表的新兴市场集装箱吞吐量在全球集装箱航运市场的比重日益上升。

随着近年来集装箱运输的飞速发展和全球范围内集装箱吞吐量的不断增加，



世界主要集装箱港口之间的激烈竞争日益加剧，对港口现有的装卸效率和管理水平都有了很大提高。目前许多集装箱码头资源调度配置存在不合理之处，如岸桥和泊位、岸桥和集卡的调度不协调等，港口资源不能充分利用，大大浪费了资源，使得船舶到港之后出现停滞等待现象。随着集装箱运输量的日益提升，要求港口通过合理的配置自身资源，减少船舶到港排队时间和装卸货物的时间，从而提高自身的核心竞争力。因此对码头资源进行科学有效的配置，提高其运作效率，降低港口成本和节省往来船舶在港停留时间对港口经营者的效益有着至关重要的作用。

### 1.1.2 研究意义

本文主要从两个方面进行了论述，港口调度和业务流程优化，共同的目的就是提升港口服务水平，提高港口作业效率，使港口作业快速有序地进行，从而为港口在激烈的竞争环境中占据一定的优势打下良好的基础。

在集装箱码头作业调度的过程中，为了提高装卸作业效率，往往会将集装箱码头的泊位调度和岸桥的分配分开来处理，而使码头的整体作业达不到理想的目标。由于码头作业过程的动态性和随机性，码头岸边资源的调度系统必须在准确地、合理地各环节的装卸工作做出快速高效的运输调度决策。

合理的调度，可以使船舶进港时间上协调起来，船舶到港立即靠向最优泊位，且已分配好最优数量的岸桥对其进行服务，尽量减少对其后到港的船舶装卸产生负面影响。

通过对港口作业流程优化理论的研究，探索港口物流作业流程之间的内在联系，进一步实现更有效的港口企业和船舶公司装卸货物物流流程优化，为后续学者对港口物流企业流程优化研究提供行之有效的理论分析方法。

## 1.2 国内外研究现状综述

### 1.2.1 港口资源调度研究现状

泊位和岸桥的调度指的是船舶进入集装箱码头前，港口码头的调度工作人员根据各泊位的空闲状况及自身物理条件约束(主要包括泊位长度、前沿水深)，对到港船舶的靠泊顺序、靠泊泊位、适当的靠泊时间及分配给该船舶的岸桥进行合理安排。合理的岸桥调度和泊位的分配能有效地缩短船舶在港逗留时间、降低码头运营服务成本，从而达到双赢的目的。

充分有效利用集装箱码头岸边资源，充分合理调度岸桥和泊位的配置，是降低港口企业营运成本和提高企业核心竞争力的必要途径。近年来，随着集装箱船舶的大型化和码头专业化的发展，国内外无论是港口企业自身或是科学学

者,均对集装箱码头岸边资源的配置进行了多方面的研究,并已取得重要进展。

从目前国内大多数研究可以看出,由于泊位的分布方式不同,岸桥调度和泊位分配的研究常常连续型泊位分配与岸桥调度研究和离散型泊位分配与岸桥调度研究。连续型泊位是指按直线布置的连续型泊位,在对其进行泊位分配时,只要满足靠泊船舶物理条件的泊位位置就可以进行靠泊工作。国内学者如余刘海,庞洪静等(2013)<sup>[1]</sup>忽略靠泊和离泊时间对连续型泊位和岸桥的协调调度进行了研究,提出了最小化计划周期内所有船舶在港时间的优化模型。并采用了遗传算法对其提出的模型进行求解。赵坤强(2011)<sup>[2]</sup>,针对连续型泊位与岸桥协同调度问题,建立关于泊位分配的混合整数规划模型,而后建立了桥吊调度的混合整数规划模型对具体岸桥进行调度,并运用 C#调用 gurobi 对模型进行求解。李娜等(2011)<sup>[3]</sup>针对连续型泊位和岸桥配置协同优化问题,构建混合整数规划模型,通过调整船舶的分配顺序,设计出新的启发式算法,并通过 VB6.0 编程进行大规模仿真算例实验,充分证明了模型和算法的可行性和有效性。欧阳玲萍等<sup>[4]</sup>(2009),针对连续型泊位分配和岸桥调度问题建立连续化泊位调度模型,进而建立了关于连续型泊位分配与岸桥调度问题的非线性规划模型,并运用改进的蚁群算法对所提模型进行分析求解。

国外也有很多学者对连续型泊位进行研究,如 Park Young Man 等(2003)<sup>[5]</sup>针对连续型泊位与岸桥协调调度问题,设计两阶段求解算法进行求解,并通过大量的数据实验证明了方法的有效性。Meisel 和 Bierwirth(2009)<sup>[6]</sup>在考虑靠泊位置变化对岸桥作业效率影响的情况下,引入靠泊位置偏离因子,对由靠泊位置引起的岸桥工作时间、靠泊停留时间增长的一系列问题进行研究处理,以最小化船舶加速费用、离港延误费用和岸桥工作时间费用之和的目标函数,建立相应的数学模型,并采用禁忌搜索、Squeaky Wheel 等智能优化算法对所列模型问题进行求解。Daganzo(1989)<sup>[7]</sup>针对连续型泊位和岸桥调度问题,建立了混合整数规划模型来对岸桥的调度进行问题求解,从而确定分配给多个船贝位的岸桥数量。Lim<sup>[8]</sup>将连续型泊位和岸桥调度问题转化为“背包”问题,假设所有到港装卸船舶在港停泊时间是固定的,并结合图论的思想提出一种有效的启发式算法进行求解。

离散型泊位是港口为方便管理将码头岸线按照往来船舶划分为若干个独立的离散泊位,船舶到港后只能选定其中一个合适的泊位进行靠泊服务,不能同时占用多个泊位。国内学者如侯宁等<sup>[9]</sup>对港口泊位分配的最优化设计方案进行探讨,建议以港口和船舶公司双方的经济利益最优的目标函数,并建立排队论模型,综合考虑泊位利用率和服务水平问题,结合实例分析,提出了提高港口和船舶双方效益的有效方法。

韩晓龙, 王正君 (2012)<sup>[10]</sup>引入了船舶工作状态的概念, 通过将船舶分为不同的工作状态, 有效的减少了港口资源的限制和浪费, 通过建立最小化船舶在港时间的模型, 并利用 LINGO 对简单的数据进行了求解, 验证了所研究的效果。韩笑乐 (2009)<sup>[11]</sup>针对服务优先级不同的船舶进行研究, 在船舶动态到达港口的情况下, 对离散型泊位分配的问题进行了研究。设计并建立以船舶总在港时间和加权船舶延迟时间之和最小化的目标函数, 并设计混合算法对该优化数学模型进行优化求解。李强等<sup>[12]</sup>以集装箱码头联合作业的均衡优化为目标, 提出均衡优化思想, 对船舶靠泊时刻、靠泊位置进行综合考虑, 建立均衡化模型, 采用自适应遗传算法和人机交互结合设计的混合算法对数学模型进行求解。

国外学者如 Edmond<sup>[13]</sup>等, 对于港口离散泊位的分配问题, 采用排队论模型进行分析, 并求解可行性。Lai 和 Shih<sup>[14]</sup>对进港接受服务的船舶采用进行先到先服务的原则, 采用启发式算法来对泊位调度的总体目标进行求解, 提高了泊位的综合利用率。Imai 等 (1997)<sup>[15]</sup>, 在考虑船舶的服务优先权对港口泊位配置的影响下, 对等候和船舶服务的时间之和进行最小化处理, 并采用匈牙利法对所提出的模型进行求解, 并通过算例实验证明其可行性。Imai 等<sup>[16-17]</sup>, 主要针对静态泊位分配问题和动态泊位分配问题进行全面深入的研究, 建立以船舶等待时间和接受服务时间最短的目标优化函数。在研究动态型泊位时, 通过拉格朗日松弛系数法对所提出的模型进行优化求解, 相比较于静态泊位更符合集装箱码头实际的情况, 对实际生活中的港口泊位分配有着重要意义。

随着全球一体化的日益发展, 近年来, 港口泊位调度的研究从单纯的泊位分配优化和岸桥调度优化转向了泊位和岸桥的联合调度优化, 相比之下, 泊位-岸桥的联合调度将两者看成一个整体, 考虑了两者之间相互制约、相互影响的关系, 联合调度较之单独调度更符合港口生产服务活动的实际情况, 是目前行业研究中的热点。

靳志宏等 (2008)<sup>[18]</sup>, 对泊位的分配和岸桥的调度进行协调调度优化, 提出最小化船舶在港逗留时间的目标函数, 对岸桥的调度和泊位的分配这两个问题进行系统分析, 并通过改进的免疫遗传算法对该问题模型进行优化求解, 证明了协调调度对于单独调度的优越性。韩晓龙等<sup>[19]</sup>, 基于连续型泊位配置优化角度, 建立了岸桥资源与泊位资源混合整数化模型, 并利用回溯法求解模型。蔡芸等<sup>[20]</sup>对集装箱码头的泊位与岸桥联合调度两个方面问题进行综合研究, 提出了最小化所有船舶总在港时间的优化模型, 并采用遗传算法对优化模型进行求解, 得出泊位分配方案, 通过仿真获得岸桥调度策略的可行解, 进而求得船舶靠泊位置、靠泊时间和同时参与服务工作的岸桥数目。韩骏等<sup>[21]</sup>对港口泊位分配和岸桥的协调调度优化方法进行研究, 提出最小化船舶在港逗留时间的泊

位与岸桥联合调度优化模型，采用免疫遗传算法对该优化模型进行了求解。

国外学者如 Li (1998) 等<sup>[22]</sup>将泊位与岸桥联合调度问题看成一个同时处理多个任务的处理机调度问题，考虑的是静态船舶问题，即所有船舶均已到港等待靠泊接受服务，提出船舶在港总停留时间最小的目标函数，提出启发式算法对模型进行求解。Liang 等<sup>[23]</sup>在考虑泊位与岸桥协调调度的问题时，建立了最小化船舶服务时间、靠泊等待服务时间及推迟离港时间之和的优化模型，并采用混合遗传算法进行模型求解。

### 1.1.2 多目标优化研究现状

在现实生活中，实际问题大多不是简单的单目标问题，同时需要满足给定的多个约束条件，且存在多个非线性目标函数。且多个目标函数之间又往往是互相矛盾、冲突的，改善一个子目标的性能可能会引起其他子目标性能的降低，若要使得全部子目标同时达到最优几乎是不可能的，这些目标函数需要同时进行优化处理以使得尽可能多的子目标达到最优或满意，这类问题就被称为多目标优化问题。其与单目标优化问题的不同之处在于其问题的目标解并不是唯一的，其目标解是由众多 Pareto 最优解组成的最优解集合组成，集合中各元素统称为 Pareto 最优解或非劣解集。

随着人工智能算法的引入，使得多目标优化问题的求解得到快速发展，像模拟退火算法、进化算法、禁忌搜索算法、粒子群算法、蚁群算法和神经网络，都已被大量的运用到多目标优化中。

一般情况下，设有  $m$  个目标函数和  $n$  个决策变量，其优化问题可以描述为：

$$\begin{aligned} \min y &= F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \\ \text{subject to } g_j(x) &\leq 0, j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) &\leq 0, k = 1, 2, \dots, K \\ x &\in D \end{aligned}$$

其中， $x \in D \subset R^n$  为  $n$  维决策变量， $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ， $x_i$  表示第  $i$  个决策变量， $D$  为  $n$  维决策空间； $y \in S \subset R^m$  为  $m$  维目标向量， $S$  为  $m$  维解空间； $F(x)$  定义了  $m$  个由决策空间向解空间映射的目标分量函数。其中， $f_i(x)$  是不等式约束条件， $h_k(x) = 0$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 定义了  $K$  个等式约束条件。

对多个目标的处理方式中主要存在以下两种方式：一是通过对各个目标进行加权的方式，把多目标优化问题的目标函数根据人为给定的权重系数转换为单目标优化问题，进而对转化后的单目标优化问题进行优化求解；二是利用 Pareto 支配关系，先求得一组互不支配的解，再对目标函数进行进一步求解。很明显，运用第一种方法需要预先制定各目标的权重，并且求得的最终结果受其影响很大，人为的因素影响很大。而在实际应用中，对于权重值的预先设定往往是复杂的，且大多是无法预知的。因此，目前在选择多目标问题的处理方

式时往往采用的是第二种方法。先求得一组互不支配的基础解集，然后在其基础上，根据多目标优化模型的实际情况进行下一步的决策。

下面给出了多目标优化中 Pareto 最优解的概念。

(1) Pareto 支配。又称 Pareto 占优，设  $x_A, x_B \in X_f$  是多目标优化问题中的两个可行解，则称  $x_A$  与  $x_B$  相比， $x_A$  是 Pareto 占优的，当且仅当  $\forall i = 1, 2, \dots, m; f_i(x_A) \leq f_i(x_B)$ ，且至少存在一个  $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ，使得  $f_j(x_A) < f_j(x_B)$ ，记为  $x_A < x_B$ ， $x_A$  支配  $x_B$ ，若只满足  $\forall i = 1, 2, \dots, m; f_i(x_A) \leq f_i(x_B)$ ，则称  $x_A$  弱支配  $x_B$ 。

(2) Pareto 最优解。可行解  $x_A \in X_f$  称为 Pareto 最优解，当且仅当  $\exists x \in X_f$ ，使得  $x < x_A$ 。

(3) Pareto 最优解集。所有 Pareto 最优解构成的集合  $P = \{x_A \in X_f, x < x_A\}$ 。

对多目标遗传算法的研究由来已久，起初始于 Schaffer<sup>[24]</sup> 提出的矢量评价遗传算法，也是全球范围内多目标优化问题研究中第一次将遗传算法与多目标问题的优化结合起来。紧接着 Goldberg<sup>[25]</sup> 于 1989 年将 Pareto 支配理论和进化优化算法结合起来，演变成求解多目标问题优化的新思路；Zhang Q 和 Li H<sup>[26]</sup> 在 2009 年提出了基于分解的遗传算法 MOEA/D，通过多目标分解技术经过分解将多目标优化问题转变成为多个单目标优化的子问题对多目标优化问题进行优化求解。S.Tiwari 等<sup>[27]</sup> 在 2008 年基于外部 Archive 的微遗传算法 AMGA，引入外部文件中非支配解的解集信息来得到分布较好的 Pareto 解集。在前面的研究基础上，S.Tiwari 等<sup>[28]</sup> 又于 2011 年对其提出的 AMGA 进行改进得到 AMGA2，在 AMGA2 中，修正和改进了 AMGA 中的种群的多样性的评价方法和遗传变异的操作，选择并应用了新的选择机制对搜索价值较低区域的探索概率进行降低。Johannes Bader 等<sup>[29]</sup> 于 2011 年通过将超容量指标引入到遗传算法中，通过对模型和求解方法的演变，提出基于 Monte Carlo 模拟快速计算候选个体的近似超容量算法并进一步计算出个体的近似超容量值，用来对个体所求解进行优劣评价。Lyndon While 等<sup>[30]</sup> 于 2012 年在 Johannes Bader 所提的方法的基础上，提出了计算超容量的算法 WFG，能够完成在群体进化过程中对候选个体性能进行评价。遗传算法自身具有良好的可扩展性，能够较容易地与其他优化技术相结合，而形成更为优越的优化算法。

从以上研究现状中可以看出，经过生活中多目标问题的多样性，学者对多目标问题的研究也越来越多，且已经有所成效。但是其中的算法却各有各的利弊，而如何针对一些算法的不足，利用好算法的优点，结合最新提出的一些技术或方法对不利的算法进行优化改进，对应用改进的优化算法解决具体的多目标问题实际问题具有重要的意义。

### 1.3 本文主要内容

集装箱码头泊位和岸桥的调度作为整个码头调度的重点，对提高码头和船舶公司的综合效率起着至关重要的作用。本文中主要是对集装箱码头连续型泊位与岸桥的协调调度进行研究，岸桥和泊位在实际调度中可能出现的各个问题进行分析研究，提出假设条件，根据集装箱码头的实际情况及船舶预计到港情况，对现正在服务的船舶和未来到港的船舶合理配置泊位及岸桥数量。使得集装箱码头管理者可以充分利用岸边资源及高效的资本效率，使船舶在港停泊时间最短，同时使得码头的服务成本最少。

本文的主要工作如下：

第一章：绪论。对本文选题的研究背景和意义进行简介说明，并对集装箱码头岸桥与泊位联合调度及多目标优化问题国内外学者的研究现状进行阐述。并对文章采用的研究方法思路进行简要说明。

第二章：对集装箱码头布局及各岸边资源进行介绍，并对岸边资源实际操作进行阐述。对岸边资源协同作业特点进行说明。

第三章：对集装箱码头船舶来往情况，并对解决问题所需的假设进行分析。进而针对船舶泊位和岸桥分配调度问题提出数学模型。

第四章：对多目标遗传算法进行概述，并对利用多目标遗传算法的操作步骤进行详细陈述，并用遗传算法对模型进行求解。

第五章：通过算例分析，结合往来港口船只的实际情况，对算例进行分析求解。

第六章：结论与展望。通过以上的分析总结得出结论，归纳总结全文。



## 第二章 集装箱码头作业流程及特点

集装箱码头包括港池，锚地，航道，泊位等水域和货运站，货场，码头，办公及生活区等地，用来适应全方位的集装箱装卸作业的地方而具有明显界限的场所。与此同时，集装箱码头还是水陆联运枢纽，是运输过程中转换运输方式时的缓冲地，也是集装箱的转运点。因此，其是整个集装箱运输的最重要过程。对集装箱码头岸边资源进行合理的配置对提高港口作业效率、降低运作成本、节省往来船舶停港靠泊时间有着至关重要的作用。

### 2.1 码头功能发展历程

码头布局：集装箱码头的整个装卸作业过程都是采用机械化、规模化生产的方式进行，这就要求各项工作单元之间密切配合、充分衔接，实现装卸系统高效化。必须使码头各装备合理布置、配置，充分地联系起来，才能保证高效率、高质量的流水线作业，减少中间环节误差。为保证集装箱码头各运作环节高效运行，需设立的设施主要有：泊位、岸桥、集卡、控制室、堆场、检查口等。下面对集装箱码头各设施进行简单介绍。

泊位（Berth）是船舶进入港口靠泊后进行装卸作业的位置集合。船舶靠泊停留后由岸桥（Quay Crane）对其进行装卸作业。由岸桥对船舶进行装（卸）作业，需要集卡（Container Truck）将集装箱准确运至（出）装卸区域，而后送到堆场（Container Yard）。堆场是将装卸后的集装箱综合放置的场所。控制室是集装箱码头的中枢控制机构，控制着集装箱码头上的各种作业。检查口（Gate）是对往来船只进行检查的出入口，在船只进出检查口时，需对船只各项信息进行检查。

发展趋势：联合国贸易与发展会议在 1992 年的《港口的发展和改善港口的现代化管理和组织原则》研究报告中，把港口发展分为三代：

第一代：1950 年之前的港口，主要的功能是进行海运货物的转运和货物的临时存储以及来往货物的收发等，货物通过各种运输方式运送到船舶后，通过船舶运向各港口再转向其他位置，实现货物在空间上的有效转移。港口是全球运输枢纽中心；

第二代：1950-1980 年代的港口，此时的港口功能较之第一代港口有所增加，主要增加了货物增值的工业、商业活动，随着集装箱和其他货运技术的出现，固体散货和液体散货运输增多，港口发展成为装卸和服务的中心；

第三代：1980 年代以后的港口，功能主要在第一代和第二代的基础上增加



运输、贸易的数据收集和处理等综合服务。随着信息化的发展和集装箱运输成为主要运输方式，船舶大型化，泊位深水化、专业化，港口与所在城市关系的日益密切使得港口成为贸易的物流中心。

据联合国贸易发展委员会（UNCTAD）《港口通讯》在 1999 年第 19 期《第四代港口》的文章中认为：在 1990 年之后全世界范围内已经出现了新一代港口——第四代港口：其反映出来的主要变化是对集装箱的处理，以港航联盟和港际联盟作为发展策略，生产最主要的特点是物流整合。

随着全球一体化的进程日益加快，港口功能日益综合化，必将形成海陆一体化的趋势。海陆一体化的发展日益趋于完善，对于集装箱港口的利用也日益增多。随着海陆一体化的发展，第四代港口必将拥有更好的发展平台，集装箱更将迎来更广泛的使用。

## 2.2 码头作业流程介绍

集装箱码头作业流程主要包括：进口卸船作业流程和出口装船作业流程。如图 2-1 和 2-2 所示：

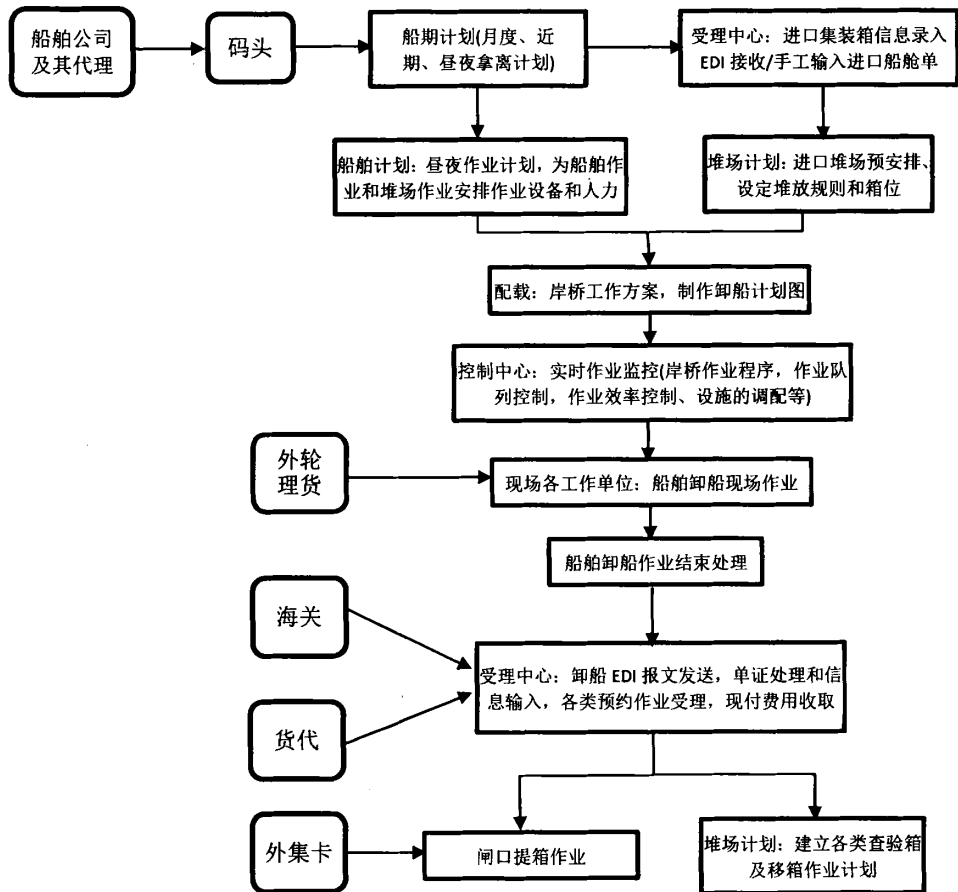


图 2-1 船舶卸船流程图

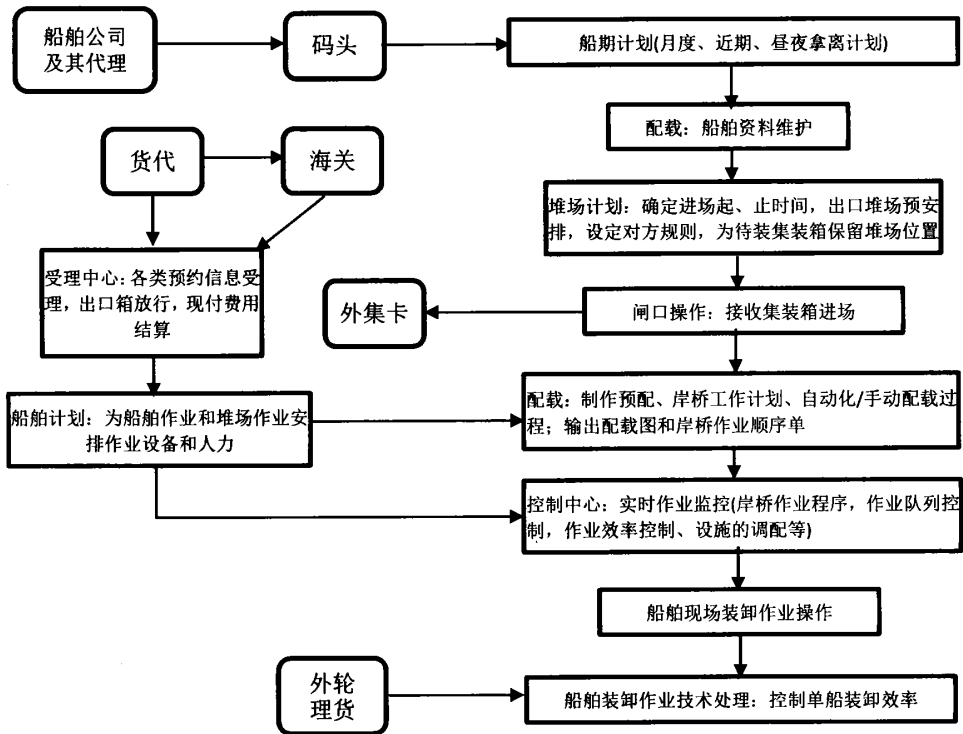


图 2-2 船舶装船流程图

## 2.3 集装箱码头作业流程特点

通过对集装箱码头的作业流程分析，可以看出集装箱码头的运作是通过多部门协同合作来完成的，涉及到的物流环节众多，且影响因素很多。集装箱码头不仅需要配备各种现代化物流设备，还需要有一套十分严密的组织管理方法。需要各工作部门、岸边资源高度协调，形成高效率的流水线作业。

下面对集装箱码头的作业流程特点进行介绍：

### (1) 多部门协作

通过对以上集装箱码头作业流程图的研究可以看出，集装箱码头的作业流程涉及到的部门众多，设备众多，环环相扣，其中任何一个部门出现偏差，均有可能导致后续工作环节的延误，增加船舶在港停留时间，增加不必要的成本投入。随着集装箱的运输量越来越大，船舶越来越大，对于集装箱码头内外部部门之间的协同合作的要求也越来越高。

### (2) 工作的连续性

船舶到港时间是由船舶预计到港时间和该泊位上一船次到港船舶装卸完毕离港时间决定的，而由于一些管理或者装卸效率等方面的原因，船舶离港时间

往往是无法准确确定的，这就需要集装箱码头上的设备及人力时时刻刻待命准备为到港船舶进行服务。集装箱码头以客户为上，为客户提供高效、优质的服务，就需要码头时刻处于工作状态。保证装卸及其他作业的连续性，使得船舶在港时间最短，提高港口作业效率。

### （3）服务模式多样性

由于各船舶所装卸货物的种类不同，且各船舶大小不定相同，这就产生了船舶的装卸模式的多样性。进港船舶的装卸涉及多个部门协作，进而要求集装箱码头服务模式的多样性，才能满足往来船舶多样性的装卸任务。只有对各个船舶供应合适的泊位和合适数量的岸桥及对应的集卡数量才能提高效率、降低成本。



### 第三章 泊位-岸桥协调调度数学模型

#### 3.1 泊位-岸桥协调调度研究及问题描述

港口资源调度研究是为了进一步优化港口调度过程，合理安排船舶进港，防止港口船舶拥挤，促进港口岸边资源的充分优化利用，提高港口综合作业效率和岸边资源利用效率。港口调度系统作为港口物流系统中最重要的组成部分，一方面与港口物流系统的其他子系统相结合，不可能脱离城市交通系统而单独存在。

在港口的调度作业中，集装箱码头的作业流程系统分为：泊位子系统、堆场子系统、集装箱运输子系统。各系统之间相互衔接充分配合来完成整个集装箱从船舶到堆场的装卸作业。其中泊位子系统由靠泊泊位、装卸岸桥、待服务船舶三要素组成，涉及到各泊位分配和岸桥调度两方面，泊位分配和岸桥的调度又直接影响船舶的装卸作业时间。泊位子系统中效率的高低直接影响到港口物流公司效益和对外信誉，是整个集装箱码头作业的瓶颈环节。

根据集装箱码头的软硬件条件和管理方式的不同，可以将泊位分为连续型泊位和离散型泊位。在对离散型泊位进行船舶分配时，按照船舶个数进行分配，直接将满足该离散型泊位的吃水和长度即可，分配方式较为简单，管理方便。缺点是不能充分利用泊位，利用率较低；而连续型泊位，其分配方式主要根据船舶的长度，相对于离散型泊位，其对于泊位的利用率高，在实际的生产工作中，连续型泊位分配较之离散型泊位复杂，管理起来难度加大。本文主要从连续型泊位的角度分析。

集装箱码头中，泊位的数量一般是有限甚至稀缺的。在泊位的调度中，实际就是根据进港或即将进港船舶的信息（包括船舶大小、预计到港时间、装卸量和最晚在港停留时间等），给船舶进行泊位分配。

在泊位子系统的实际操作中，由于岸桥调度和泊位调度常常作为两个独立的环节运作，常常会出现航运公司船舶、岸桥、泊位相互等待的现象，如当船舶按照其预先计算的最优靠泊计划靠泊后，没有足够数量的岸桥来对该船舶进行服务或找不到最优数量和能力的岸桥来为之服务，这样就产生了船舶的等待时间。岸桥和泊位的联合调度过程中不仅要满足船舶在港时间最小，还需满足港口总作业时间最短，即假设船舶数量在一定的条件下，通过岸桥和泊位的联合调度以期在最短时间内完成船舶在港口的装卸作业，保证港口和航运公司的双方利益。

泊位和岸桥的联合调度研究，对提高现阶段船舶在港口的作业效率、缩短

```

graph LR
    A[船舶到港] --> B[选择能就近分配安桥的泊位岸线]
    B --> C[分配安桥]
    C --> D{是否在港时间最短}
    D -- Y --> E{岸线位置是否空闲}
    D -- N --> B
    E -- Y --> F{岸桥是否可用}
    E -- N --> G[锚地等待]
    F -- Y --> H[装卸作业]
    F -- N --> I[泊位等待]
    G --> F
    I --> H
    H --> J[离港]
  
```

### 3.2 数学模型

- (1) 每个岸桥只有在为一艘船舶结束服务时才能为下一艘船舶进行服务。
- (2) 待靠泊的船舶对与泊位没有物理或技术上如船舶吃水和水深等约束的限制。
- (3) 不考虑装卸过程中岸桥的故障和集装箱翻箱情况。
- (4) 岸桥一旦开始为某船舶服务, 为该船舶装卸完毕后方可为下一艘船舶服务。
- (5) 考虑到连续型泊位岸桥移动的问题, 若为同一船舶服务的岸桥超过 2 个以上, 则分配的岸桥位置必须相邻, 以防止岸桥的闲置。
- (6) 船舶靠泊以后立刻就有岸桥为之服务, 否则不让该船舶停靠泊位。
- (7) 考虑到船舶自身物理及装载量的限制, 为某船舶服务的岸桥数不能超过船舶所能允许的最大岸桥数。还需满足为同一船舶服务的不同岸桥的开始服务时间可以不同, 但必须同时结束, 以保证现接受服务的船舶能在最短时间内离港。
- (8) 每条船舶计划作业时间是一定且已知的。
- (9) 假设船舶之间的安全距离计入船舶自身长度。

## 3.2.2 模型建立

为便于建立模型, 本文引入一些符号, 对其含义解释如下:

$S$  为连续型泊位总长度, 单位  $m$ ;

$|Q|$  为岸桥集合,  $|Q| = \{1, 2, \dots, q, \dots\}$ , 总数为  $Q$ ;

$Z$  为船舶集合,  $Z = \{1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, |Z|\}$ ,  $i, j$  为船舶编号, 并且以到港时间先后编号, 即  $i$  比  $j$  先到;

船舶  $i$  安全停靠后所占用的空间长度为  $L_i$ ;

$T$  为计划周期内单位时间集合;

$g_q$  为岸桥  $q$  单位时间内的装卸效率;

$N_i$  为船舶  $i$  上集装箱的个数;

$W_i$  为船舶  $i$  进入港口锚地等待的时间;

$R_i$  为船舶  $i$  离开港口的时间;

$E_i$  为船舶  $i$  开始接受服务的时间;

$p_i$  为船舶  $i$  的偏好靠泊位置;

$b_i$  为船舶  $i$  停靠的起始位置;

$i_{q,t}$  表示  $q$  岸桥  $t$  时刻所服务的船舶为  $i$ ;

$y_{ij}$  为 0-1 变量, 若第  $i$  艘船在第  $j$  艘船开工之前结束服务, 则为 1, 否则为 0;

$z_{ij}$  为 0-1 变量, 若第  $i$  艘船停泊在第  $j$  艘船的下方(如图 2 中船舶 3 和船舶 2 的关系)则为 1, 否则为 0;

$h_{it}$  为 0-1 变量, 如果  $t$  时段第  $i$  艘船在泊位中接受服务时为 1, 否则为 0;

$Y_{k,i,t}$  为 0-1 变量, 如果在  $t$  时刻船舶  $i$  停靠在了岸线  $k$  处则为 1, 否则为 0;

$W_{q,i,t}$  为 0-1 变量, 如果岸桥  $q$  在  $t$  时刻为船舶  $i$  服务则为 1, 否则为 0;

设  $T_{q,i}$  表示岸桥  $q$  对船舶  $i$  进行服务的时刻, 如果  $q$  没有对船舶  $i$  进行服务则  $T_{q,i}$  为 0;

$M_{\max,i}$  为第  $i$  艘船所能容纳的同时服务的最大岸桥数。

以计划周期内单位时间集合  $T$  为横坐标, 以连续型泊位总长度  $S$  为纵坐标, 建立连续型泊位-时间坐标系示意图, 如图 3-2 所示。



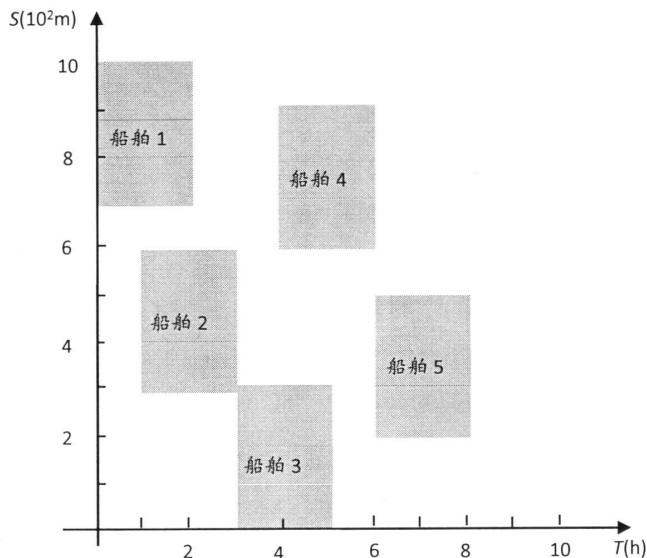


图 3-2 连续型泊位-时间坐标系示意图

### 3.2.3 目标函数

本文连续型泊位与岸桥联合调度多目标优化模型的目标分别是：最小化船舶总在港时间和最小化码头的服务（生产）成本。

#### （1）最小化船舶的总在港时间

在泊位和岸桥的联合调度中，由连续型泊位-船舶靠泊时间坐标图可以看出，各个船舶到港的时间已经确定的，如何合理的安排船舶到固定的泊位靠泊装卸就成为港口工作人员首要解决的问题，减少总在港时间不仅有利于港口服务效率的提高，还有利于提高港口的对外信誉，吸引更多的船舶选择该港口进行装卸。

到港船舶的在港逗留时间总和等于所有船只离开港口时间与船舶到港时间之差，故本文考虑的最小化船舶总在港时间的模型可以表示为：

$$F_1 = \text{Min} \sum_{i \in |Z|} (R_i - W_i) \quad \text{公式 (3-1)}$$

#### （2）码头的服务成本

在集装箱船舶进入港口停泊之前，港口会按照各船舶预定到港时间结合码头岸边资源的使用情况，预先对船舶进行泊位和岸桥的分配；如果船舶不能按时到达预定的泊位就会造成后续工作的延误。势必会增加拖车的调动和岸桥的移动距离的增加进而增加装卸成本。由于岸桥移动单位距离成本是一定的，可将码头服务成本转换成最小化岸桥移动距离，即本文中最小化码头服务成本模型的目标函数可以写为：

$$F_2 = \text{Min}[c_1 \sum_t \sum_q \sum_i (W_{q,i,t} Y_{k,i,t} \cdot |p_i - k|) + c_2 \sum_i N_i |b_i - p_i|] \quad \text{公式 (3-2)}$$

s.t.

$$\sum_q g_q \sum_t \sum_i h_{it} \leq \sum_i N_i \quad \forall t \in T \quad \forall i \in |Z| \quad \forall q \in |Q| \quad \text{公式 (3-3)}$$

$$\sum_t i_{k,t} * h_{it} \leq M_{\max,i} \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-4)}$$

$$\sum_t h_{it} = R_i - E_i \quad \forall t \in T \quad \forall i \in |Z| \quad \text{公式 (3-5)}$$

$$h_{it} \leq 0 \quad t < E_i \quad \forall i \in |Z| \quad \text{公式 (3-6)}$$

$$\sum_t W_{q,j,t} > 0 \quad \forall t \in T \quad \forall i \in |Z| \quad \text{公式 (3-7)}$$

$$\prod_{T,q,i}^{R_i} W_{q,j,t} = 1 \quad \forall q \in Q \quad \forall j \in |Z| \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-8)}$$

$$(b_i + L_i - b_j) * (E_j - E_i) \leq 0 \quad E_j, E_i \in T \quad \forall i, j \in |Z| \quad \text{公式 (3-9)}$$

$$t'' - t' + 1 \leq \sum_{t'} \sum_i^{t''} W_{q,i,t} + M(2 - \sum_i W_{q,i,t'} - \sum_i W_{q,i,t''})$$

$$\forall q \in Q \quad \forall i \in |Z| \quad \forall t \in T \quad \text{其中 } t'' > t' \quad \text{公式 (3-10)}$$

$$W_{q,j,t} * \sum_k Y_{k,j,t} > 0 \quad \forall q \in Q \quad \forall j \in |Z| \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-11)}$$

$$t'' - t' + 1 \leq \sum_{t'} \sum_j^{t''} Y_{k,j,t} + M(2 - \sum_j Y_{k,j,t'} - \sum_j Y_{k,j,t''})$$

$$\forall q \in Q \quad \forall j \in |Z| \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-12)}$$

$$\sum_i i_{q,t} * h_{it} \leq Q \quad \forall i \in |Z| \quad \forall q \in |Q| \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-13)}$$

$$\sum_i h_{it} * L_i \leq S \quad \forall i \in |Z| \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-14)}$$

$$\sum_{k \in S} Y_{k,j,t} = L_i \quad \forall j \in |Z| \quad \forall t \in T \quad \text{公式 (3-15)}$$

$$W_{q+1,i,t} + W_{q-1,i,t} - W_{q,i,t} = \{-1, 0, 1\} \quad \forall t \in T \quad \forall q, q \pm 1 \in Q \quad \forall i \in |Z| \quad \text{公式 (3-16)}$$

$$Y_{k,j,t} = h_{jt} \quad \forall t \in T \quad k \in S \quad \forall j \in |Z| \quad \text{公式 (3-17)}$$

### 3.3 约束条件

(3-3) 为所有岸桥总服务的集装箱个数大于所有船舶所装集装箱数量。

(3-4) 为某船舶工作岸桥数必须小于或等于该船舶可接受最大服务岸桥数量。

(3-5) 为泊位被占用时间等于船舶接受岸桥服务时间。

(3-6) 为船舶没有到达港口靠泊完毕之前不会被服务。

(3-7) 为船舶结束服务之前，一直有岸桥为该船舶进行服务。

(3-8) 为在不影响其他船只的情况下，为确保单个船只的在港时间最短，为同一船舶服务的岸桥可以不同时开始为该船舶工作，但需同时结束工作。

(3-9) 为图2中各船舶空间和时间位置不会有重叠。

(3-10) 为船舶从靠泊后开始接受服务到结束服务不会被其他船舶的情况打断。

(3-11) 为船舶一旦有岸桥为之服务，必须占用泊位岸线。

(3-12) 为某泊位岸线一旦被一船舶占用，该船舶离开前该泊位岸线结束服务之前一直占用该岸线接受服务。

(3-13) 为任意时刻工作中的岸桥数不可大于该码头岸桥总数。

(3-14) 为所有在泊位中停靠的船舶占用的空间长度小于泊位长度。

(3-15) 为船舶停靠岸线后，占用岸线长度等于船舶空间长度。

(3-16) 为在船舶需要接受多个岸桥的服务时，这几个岸桥必须是相邻或连续的。

(3-17) 为船舶一旦在泊位中接受服务，必须占用岸线，两个数存在数值上的相等性。

### 3.4 模型优化方法的选择

很容易看出，上文中的数学模型属于多目标优化模型。在现阶段的研究方法中主要使用传统的多目标优化方法和多目标优化进化方法求解多目标优化问题。

#### 3.4.1 传统的多目标优化算法

在实际中，大多数优化多目标问题都具有 NP(non-deterministic polynomial) 难度，传统的多目标优化算法具有众多的优点，但几乎都具有技术自身难以克服的缺点。现实生活中的大多问题都具有多个目标，在这一个问题模型中，存在多个目标，并且多个目标需要满足所有的约束条件，要同时对这些目标进行优化处理，但这些目标往往又是互相冲突的。这类问题被统称为多目标优化问题<sup>[31]</sup>。

利用传统多目标优化算法对多目标问题进行求解的总体思路是：将多目标优化问题通过某种技术手段转化为多个单目标问题，通过求解转换之后的多个单目标优化问题而达到求解多目标优化的问题的目的。求解传统多目标优化问题常用的方法有：

(1) 加权求和法<sup>[32]</sup>

该方法是由 Zaedh 提出, 将多目标优化问题中的各个子目标按照线性组合的方式转换为单个总体目标, 然后进行优化求解。其表达式如下 (3-18) 所示:

$$p(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad \text{公式 (3-18)}$$

其中,  $p(x)$  为总体目标函数,  $w_i$  为加权系数,  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

加权所使用的系数是由人为地根据各子目标函数的重要程度进行确定。很明显, 权重选取对各个目标重要程度有很大关系, 带有主观性, 需要在实践中不断改进。

(2) 约束法<sup>[33-34]</sup>

实质是从多目标优化问题中选取其中一个子目标函数作为待优化目标函数, 而将其他子目标函数按约束条件对待。其表达式如式 (3-19) 所示:

$$\begin{aligned} & \text{Min} f_i(X) \\ \text{s.t.} \quad & f_i(X) \leq \varepsilon_i, 1 \leq i \leq m, i \neq j \\ & x \in X_f \end{aligned} \quad \text{公式 (3-19)}$$

其中,  $\varepsilon_i$  作为上界, 由人为设定, 在优化过程中可调节 Pareto 最优解, 该方法的实现也存在人为因素的影响。

(3) 目标规划法<sup>[35]</sup>

目标规划法是先单独求出各目标函数的最优解集, 然后对这些最优解进行归一求和, 从而实现多目标优化。表达式如 (3-20) 所示:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{f_i(x) - f_i(x^*)}{f_i(x^*)} \right]^2 \quad \text{公式 (3-20)}$$

关键在于各目标函数最优解集的求解过程。该方法虽可避免人为主观因素对最优解的影响, 但归一化求和后的 Pareto 最优解往往无法满足多目标优化问题的实际要求。

传统的优化算法一般具有计算效率较高、成熟性好、可靠性较好等优点, 但很难满足现代工程实践要求。随着信息化技术的发展, 人们提出更加科学合理的智能优化算法来弥补现代工程实践的需求。

## 3.4.2 智能优化算法

智能优化算法是人类对自然界某一现象或过程的模拟而建立起来的智能优

化方法。智能优化算法比传统的数学规划方法更适合求解多目标优化问题。下面介绍几种应用较广泛的部分算法。

#### (1) 多目标进化算法 (MOEA)

多目标进化算法能够在单轮优化过程中处理较大规模的搜索空间, 可以产生多个均衡解, 并可以有效克服传统数学规划方法在产生优化解过程中的局限性, 因此其作为一种多目标优化方法得以广泛应用。多目标进化算法设计的大多数多目标进化算法都是围绕如何高效地实现上述目的。

多目标进化算法对问题的求解过程表示为染色体的最优保留的过程。通过环境对染色体的筛选, 最终收敛得到比种群内其他个体更能适应当前环境的个体, 就得到该多目标问题的最优或满意解。

在达尔文的进化论中, 认为每一物种在不断的进化过程中只有越来越适应环境变化的子代种群才能得以生存, 从而被保留下来, 将适应环境的基因遗传到下一代, 使得该物种更能适应环境的变化。在子代中也在不断的发生变化, 只有能够适应环境新变化的个体或种群才能被保留下来。

通过对生物进化论中的“适者生存、优胜劣汰”的自然法则进行模拟, 进行问题的求解。即当个体的性能越能适应环境, 则越容易被环境所保留下来, 并将能适应该环境的基因遗传到下一代子个体中, 从而使得个体的优良基因得以传承, 直到搜索到近似最优或满意解。

#### (2) 多目标粒子群算法 (MOPSO)

1995 年, Kennedy 等受飞鸟集群活动规律性的启发提出了一种智能计算方法: 粒子群算法。粒子群算法是通过对动物集群活动行为的观察, 并利用种群内个体之间信息的共享和传递, 使得群体内个体的运动轨迹在求解空间中产生从无序到有序的演化, 而获得最优或满意解的方法。

#### (3) 多目标模拟退火算法 (MOSA)

模拟退火算法是通过寻找和发现固体物质的退火过程与组合优化问题之间的相似性而提出的优化算法。本质是固体物质从某一初始问题开始降温, 随着温度的降低, 结合概率的突跳特征在解空间中搜索最优或满意解。模拟退火算法对于单目标优化问题较之其他算法具有较强的优化能力。对多目标模拟退火算法的研究开始于 1985 年, 多目标模拟退火算法现已成功应用于求解多目标优化问题中。

#### (4) 多目标蚁群算法 (MOACO)

蚁群算法是通过对自然界中蚂蚁搜索事物行为研究而提出的, 源于对自然界中群居生活的蚁群可以成功完成很多单个蚂蚁无法单独承担的工作的研究。蚁群之间的这种特性是由于在蚂蚁之间借助信息元素的一种化学物质来进行物

质向信息的传递和交流。目前，多目标蚁群算法已广泛应用于多目标优化问题的求解中。

### 3.4.3 多种方法对比分析

传统的多目标优化算法虽然在计算思路和过程中继承了单目标优化方法的成熟的算法机制，但对于大规模优化问题，传统的多目标方法较之智能优化算法还是存在一定的局限性。作为一种多目标优化方法，智能优化算法已经得到广泛应用，较之传统的多目标优化算法，智能优化算法可以处理较大规模的搜索空间，在每次单轮优化期间可以产生多个均衡解，并能够有效地克服传统多目标优化方法在优化求解过程中的局限性。

通常，在求解多目标优化问题时采用智能优化算法是希望获得以下三个目标：

- (1) 使得得到的智能优化结果的非劣前端与 Pareto 最优前端之间的距离变得最短；
- (2) 使得得到的智能优化结果的非劣前端的范围最大，也就是尽可能使非劣解的目标空间覆盖每个子目标尽可能触及的范围空间；
- (3) 使得智能优化结果的分布性能较好。

考虑到泊位分配与岸桥调度数学模型的复杂性和约束条件多样性，通过上文中对传统多目标优化方法和智能优化方法的分析和比较。本文拟采用多目标遗传算法对文中模型进行求解，将计算机科学与自然界遗传机制充分结合，按照生物进化论的方法对模型最优解或满意解进行概率搜索，能较容易地获得全局最优解。



## 第四章 泊位与岸桥协调调度模型求解

### 4.1 多目标遗传算法相关理论

#### 4.1.1 遗传算法

##### (1) 遗传算法基本原理<sup>[36]</sup>:

遗传算法的基本原理是生物进化论和遗传学的相关原理。达尔文进化论主要包括以下四个学说:一般进化论、渐变论、共同祖先学说和自然选择学说。由于弱肉强食、适者生存的自然界生存斗争机理不断进行,适应变异性和生存斗争能力强的个体更容易被保留下来,相对较弱的个体易被淘汰。经过环境的选择作用,物种变异特征特定的向更适应环境变化的方向积累,演绎成为新物种。种群的变异进化经过环境的选择被保留下来的过程就是物种进化的过程。每一子代个体基因型对环境的适应所产生的变化的保留与否都会影响种群基因库的组成。物种种群基因库组成的改变就形成了该种群的进化。

遗传算法是从待求解问题可能是满意解的一个初始解开始,称为初始种群。染色体作为遗传基因物质的主要载体,是控制个体性状基因的集合体,通过染色体上面的基因物质决定个体的外在性状特性的外部表现,例如皮肤的颜色的表现特征是染色体中控制皮肤颜色特征的某个基因的组合而决定的。因而,在染色体进行重组和交叉之前需要首先实现基因表现性到基因型的转变,完成编码工作。鉴于基因编码工作的复杂性,人们在进行编码工作时一般会进行编码形式简化,如二进制编码方式。初始种群生成之后,经过逐代之间重组交叉及变异产生出越来越能适应环境变化的近似解。在每一代生成的个体种群中,按照个体适应度值大小来对个体进行挑选,其中适应度值大的个体,对环境的适应能力更强,更近似于最优解。

##### (2) 关键要素<sup>[37]</sup>:

遗传算法在操作过程中存在多个关键要素。主要包括:染色体编码方法、生成初始群体、适应度函数、遗传算子、运行参数和遗传操作。

染色体编码方法:指个体的编码方法。首先要将问题的模型结构和参数进行编码化,然后通过计算机对编码后的模型求解。

初始群体生成:已知遗传算法是对种群群体交叉变异的过程,故而在对问题使用遗传算法求解之前,需对遗传算法准备若干个初始解。群体规模的大小受到遗传操作过程的影响,规模相对较大的群体中个体越有更高的多样性。算法越容易实现,遗传操作所需处理的模式就越多,越容易生成最优或满意解。



但是，群体规模越大，计算量就越大，进而影响计算时间。

适应度函数：适应度评价是对解集好坏的度量，其依赖于种群的关系。指的是按照个体适应度大小的方式决定个体遗传到下一代种群群体中的概率大小。一般情况下，适应度值大的个体更容易遗传到下一代种群中。适应度函数的确定是演化过程中生成个体选择的主要依据。

基本遗传算法计算过程中通常使用下面三种遗传算子<sup>[38]</sup>：

①选择运算，使用比例选择算子，从群体中选出优良个体作为父代进行繁衍得到子代个体，选择运算的作用是根据适应度函数值的大小判断个体优良程度。适应度较高的个体更容易遗传到下一代使得高质量的解比劣质的解有更高的存活率。

目前常用的选择运算有：轮盘赌选择方法；精英个体保存策略；排序选择算子联赛；选择算子；随机遍历选择算子等。

②交叉运算：交叉运算是遗传算法操作过程中的核心步骤。有助于加快遗传算法的搜索能力。通过选定的父代个体以确定的交叉概率进行交叉操作。重复上面的交叉过程直到所有需交叉过程完成交叉运算操作是生成新个体的过程。

目前常用的交叉运算有：单点交叉、均匀交叉和多点交叉；实数编码则一般使用算数交叉和启发式交叉等。

③变异运算：操作过程是对个体基因串中的某些基因上的基因值按一定概率随机变动。

遗传算法的变异运算是交叉运算无法对搜索空间细节充分搜索的补充。为了维持群体多样性，增加产生最优解的概率，防止早熟现象的出现。

遗传算法在操作之前需要对四个运行参数进行提前设定：M：群体规模大小，群体规模中所含个体的总数，群体规模大小一般取 20~100；T：遗传算法运行过程中的进化代数不是无限制的，在运行到一定代数后最优解便会趋于近似，故操作之前需要设定遗传运算的终止进化代数，一般取为 100~500；Pc：交叉概率，一般取为 0.4~0.99；Pm：变异概率，一般取为 0.0001~0.1。

### （3）基本步骤：

如图 4-1 所示，给出了遗传算法基本流程图。

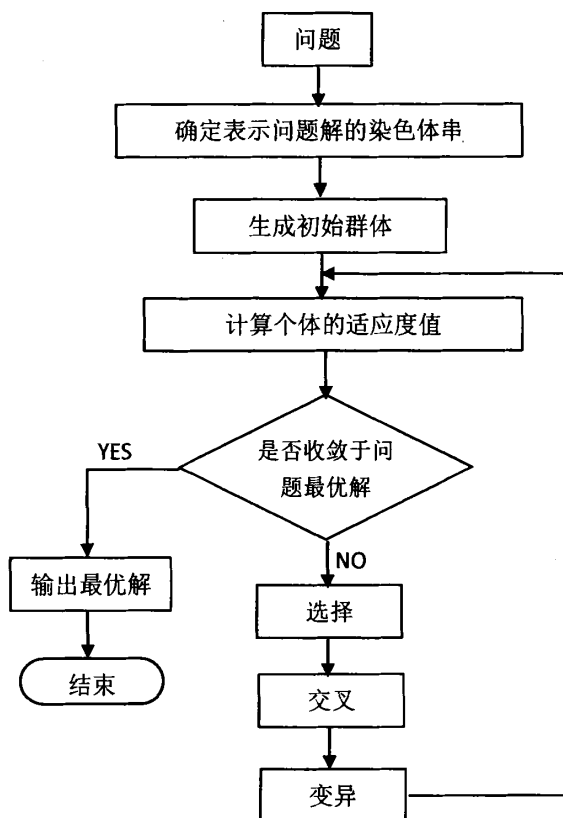


图 4-1 遗传算法基本流程图

第一步：随机生成一定数量的初始种群，每个个体表示为基因编码的染色体；

第二步：判断每个个体适应度值大小是否符合遗传算法优化原则，如若符合，就输出最佳个体及其所代表的最优解情况，并终止遗传算法操作流程；否则转向第三步；

第三步：根据适应度值大小选择子代个体，适应度值较大的个体被选中的机会较大，适应度低的个体就意味着对环境或者约束条件的适应能力较弱，可能会被淘汰；

第四步：进行交叉运算的操作，按照一定的交叉概率和交叉方法进行交叉操作，并生成新的子代个体；

第五步：进行变异运算的操作，按照一定的变异概率和变异方法对交叉生成的子代个体进行变异操作，并生成新的种群个体；

第六步：通过第四步和第五步的运算生成新一代种群，返回到第二步循环操作以上流程。

#### 4.1.2 多目标遗传算法相关释义

多目标遗传算法是在遗传算法的基础上,用来解决多目标问题的遗传算法。通常情况下,多目标优化问题<sup>[39]</sup>可定义成:

$$\begin{aligned} \min F(x) &= (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \\ \text{s. t. } g_i(x) &= 0; i = 1, 2, \dots, m; x \in \Omega \end{aligned}$$

其中,  $f_k(x)$ 代表多个目标函数,各目标函数通常是相互冲突的,且至少有两个目标函数之间有交集,优化其中一个目标可能会导致另外一个或几个目标性能的降低。根据各约束条件优化目标函数,使得各子目标函数尽可能达到极值,这就是多目标问题的优化过程。

由于各目标的冲突关系,对于”最优解”就是寻找到一个使得所有目标函数决策者都能认可的解。著名的法国社会学家和经济学家帕雷托 (Vilfredo Pareto) 在 1896 年对最优解的概念进行推广。定义如下<sup>[40]</sup>:

定义 1 (Pareto 优胜): 对于决策变量  $a$ 、 $b$ , 有

$a > b$  ( $a$  优于  $b$ ): 当且仅当  $f(a) > f(b)$

$a \geq b$  ( $a$  弱优于  $b$ ): 当且仅当  $f(a) \geq f(b)$

$a \sim b$  ( $a$  无差别于  $b$ ): 当且仅当  $f(a) \not\geq f(b) \wedge f(b) \not\geq f(a)$

定义 2 (Pareto 支配): 解  $x^0$  支配:  $x^1$  ( $x^0 > x^1$ ) 当且仅当

$$F_i(x^0) \geq F_i(x^1), i = 1, 2, \dots, M$$

$$F_i(x^0) > F_i(x^1), \exists i = \{1, 2, \dots, M\}$$

定义 3 (Pareto 最优解): 对于集合  $A \subseteq X_f$ , 决策向量  $x \in X_f$  为非劣的当且仅当

$$\nexists a \in A: a > x \quad (\text{即不存在属于集合 } A \text{ 的向量 } a \text{ 优于向量 } x)$$

即: 当且仅当  $x$  在  $X_f$  中是非劣的时候, 决策向量  $x$  才是 Pareto 最优解。

定义 4 (非劣集和前端): 假设  $A \subseteq X_f$ ,  $P(A)$  为  $A$  中非劣决策向量的集合:

$$P(A) = \{a \in A | a \text{ 是 } A \text{ 中非劣向量}\}$$

$P(A)$  称为  $A$  的非劣集, 与其对应的目标函数  $f(P(A))$  称为  $A$  的非劣前端。相应的  $X_f$ ,  $X_f = p(X_f)$  为 Pareto 最优集,  $Y_p = p(X_p)$  为 Pareto 最优前端。

#### 4.2 多目标遗传算法选择方法

对于应用遗传算法求解多目标优化问题 Pareto 最优解, 国内外学者已经提出很多方法。下面主要介绍六种常用选择方法<sup>[41]</sup>。

(1) 排序选择法

排序选择法的基本思想是从种群中,根据计算出来的个体 Pareto 最优程度,依次类推,对种群中所有个体都操作完毕,从大到小,进行排序。根据这种排序方法可使得排在前面的 Pareto 最优个体进入下一代种群中的机会更大。通过事先设定好的终止代数,就可以找到 Pareto 最优或满意解。由于多目标问题的复杂性,在进化过程中某一代所产生的 Pareto 最优解不一定是多目标函数的最优解,这时取达到终止代数时所有 Pareto 最优个体中排在前排的几个 Pareto 最优个体作为该多目标函数的最优解集。

其进行 Pareto 最优个体排序过程如下:

①设置初始个体序号;

②计算群体中 Pareto 最优个体;

③从群体个体中排除这些 Pareto 最优个体,然后将剩下的按最优程度进行排序;

④若群体中所有个体未处理完毕,转到 b;处理完毕,自动结束。

从以上 Pareto 最优个体产生方法中可知,排序选择法在实际操作的过程中仅考虑了个体之间的优越程度,而未对各个解的分散程度进行分析,这就使得该方法能相对容易地搜索到多个相似的局部 Pareto 最优解,但难以找到分布广泛的全局最优解。

## (2) 并列选择法

并列选择法的操作方式是:将初始种群中个体按照子目标函数的个数均匀地分为若干个子群体,然后将子目标函数和这些分配后得到的子种群随机配对,然后对这些各个目标函数进行相应的子种群中独立运算。从各个子群体的计算结果中选择出适应度较高的个体组成新的子代群体,并进行种群合并。在该群体中先后进行交叉和变异运算,进而生成种群的第二代完整群体,如此反复进行“种群拆分—随机选择—种群合并”,直到运行到事先设定的终止代数。如图 4-1 所示为并列选择法的示意图。

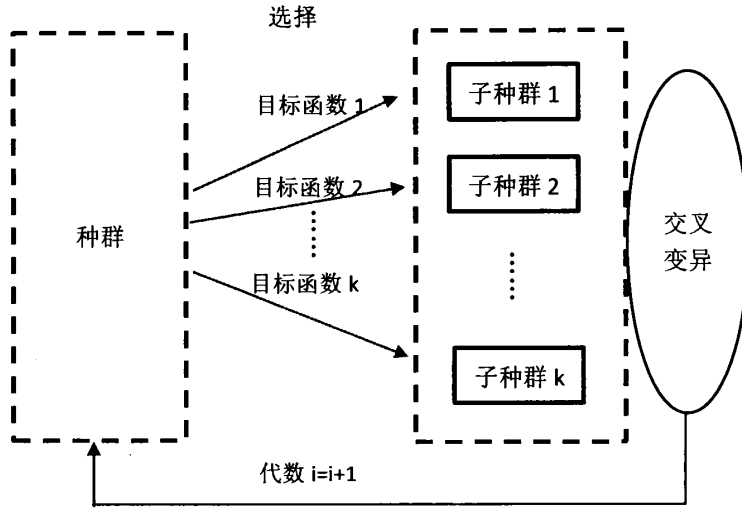


图 4-1 并列选择法

### (3) 共享函数法

在对多目标优化问题进行优化求解时，考虑到产生的解覆盖面的广泛性，会尽量避免所得到的解在其 Pareto 最优解聚集内的某一较小的区域上而尽可能地均匀分散在整个 Pareto 最优解范围内。为达到上面条件及要求，将小生境技术引入到遗传算法中来求解多目标优化问题，这就是共享函数法。小生境是指生物个体和其相似的个体共同生活的特定环境。通过引入小生境技术，可以使得相似个体在特定环境中遗传并进化，更容易找到全局最优解，减少遗传算法容易获得局部最优解的缺点。种群中的各个个体两两之间都存在一定的关系，

共享函数就是对种群中相同或者相似的个体数量进行限制，在遗传进化的过程中，通过调整个体适应度值大小进行选择操作而达到种群中个体呈分散状态的目的。

对于一个特定个体  $i$ ，用一个共享函数来表示其与种群内其他个体的相似程度。那么共享度可以用共享函数和表示，如下式 (4-1) 所示：

$$S_i = \sum_{j=1}^k S(d_{ij})(i = 1, 2, \dots, k) \quad \text{公式 (4-1)}$$

其中： $S_i$ 代表共享函数和， $d_{ij}$ 代表个体 $i$ 和 $j$ 的相似度。

在该方法中，得出个体的共享度后，根据下式 (4-2) 对适应度进行调节：

$$F'_i(x) = F_i(x)/S_i(i = 1, 2, \dots, k) \quad \text{公式 (4-2)}$$

其中 $F'_i(x)$ 为调节后的适应度函数,  $F_i(x)$ 为原适应度函数, 经过适应度的调节使得 $S_i$ 较小的个体被选择进入遗传进化的概率较大, 而提高种群中个体多样性, 增加解集分散度。

#### (4) 混合法

引入混合法的目的是减少在求解过程中容易出现的局部搜索能力较差和早熟现象, 在算子的选择上采用并列选择法, 通过对最佳个体的无条件保留和共享函数的方法, 减单独使用一种选择方法的弊端。

主要运算过程为:

①并列选择过程。将初始种群中全部个体按照子目标数量进行均匀等分, 分为若干个子群体, 然后将子目标函数和这些分配后得到的子种群随机配对, 对这些各个目标函数在相应的子种群中进行独立运算。从各个子群体的计算结果中选择出适应度较高的个体组成新的子代群体, 并合并成完整的群体。

②保留最优个体过程。在运算生成子代的过程中, 对于生成的 Pareto 最优个体, 不再进行变异运算和与其他个体进行交叉运算。直接将这些最优个体保留到子代种群中。

③共享函数过程。如果经过上面两个过程得到的 Pareto 最优个体的数量已经超过规定的群体规模大小, 则使用共享函数方法对得到的 Pareto 最优个体进行选择, 以种群规模大小决定留下的 Pareto 最优个体数量, 形成子群体。

#### (5) 权重系数法

对于多目标优化问题函数 $F(x)$ 有  $k$  个子目标函数, 各个目标对于总优化问题重要程度各不相同。按照权重系数法, 对各子目标赋予一组权重系数 $\beta_i (i = 1, 2, \dots, k)$ , 使得 $\sum_{i=1}^k \beta_i = 1$ , 且各子目标函数的加权重系数和为:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot f_i(x)$$

使用权重系数法, 可以加快问题的计算效率, 并且可以得到较其他方法更好的初始解。而对于权重系数的确定则成了该问题的最大难点, 如果关于该问题足够的信息时, 很难精准确定适当的权重系数。

#### (6) 外部辅助选择法

外部辅助选择法本质涵义是将每一代生成的非劣解都存储于一个可以更新的存储器中, 该存储器自己组成一个群体, 处于种群算法的外部。种群中个体的适应度值与外部存储器中比该个体优秀的个体数量有关, 并且利用外部存储器中 Pareto 优的关系保持群体的多样性, 使用聚类方法保证外部存储器中非劣个体数目不得多于规定的范围, 并且不破坏其特征。

### 4.3 多目标遗传算法的准备

#### 4.3.1 个体编码

采用多目标遗传算法的目的是找到进港船舶在对应时间下分配的最优泊位和岸桥数量。在对港口泊位和岸桥的调度问题进行研究求解时，可以将其分解成为一个泊位分配的指派问题和岸桥分配的排序问题，泊位的分配和岸桥的调度之间又是相互联系、相互制约的。两个问题同时决定了船舶的在港滞留时间。

在建立集装箱码头泊位和岸桥优化调度模型时，综合考虑集装箱码头的实际情况，需要考虑船舶到港后的三个问题：进港船舶的靠泊顺序，进港船舶的靠泊泊位及分配给对船舶进行服务的岸桥数量。构建如图 4-2 所示的  $(|V| \times 3)$  染色体编码。染色体的每一列代表每艘船舶的相关船舶信息。由图中可知，染色体的第一行表示进港船舶靠泊顺序，用 $t_i$ 表示船舶靠泊时间，船舶的靠泊时刻是由该船舶待靠泊泊位位置上一艘船舶了离港时间和船舶的靠泊顺序决定的；第二行染色体表示船舶的靠泊位置 $b_i$ ；第三行染色体表示对相应的船舶分配的岸桥数量 $x_i$ 。

船舶编号	1	2	3	4	5
子染色体 1 (开始时间)	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
子染色体 2 (靠泊位置)	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
子染色体 3 (分配岸桥数量)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$

图 4-2 染色体编码说明

#### 4.3.2 种群初始化

关于初始种群的生成，为了确保种群多样性，防止在进化过程中产生不可行解，本文使用随机生成的方法。即子染色体 1 中船舶的开始服务时间的先后顺序符合在满足每艘船舶只在泊位中停泊一次的原则随机从船舶集合选取。靠泊的泊位也从泊位集合中随机产生；船舶的作业岸桥数目从岸桥集合中随机选取，但需要满足模型假设及约束条件，即同时工作的岸桥数量必须不得大于船舶接受同时工作的最大岸桥数目。每艘船舶均只有一次靠泊机会，且需满足各

约束条件。

#### 4.3.3 适应度函数的确定<sup>[42]</sup>

在基本遗传算法操作过程中，按照个体适应度值的大小来决定群体中该个体遗传到下一代群体被保留的机会的多少。适应度值较大的个体相对于适应度较小的个体遗传到下一代种群的机会要更大一些。适应度函数反映个体的好坏和个体差异的标准。对于最小值优化问题的适应度函数设计，可以用相对较大的数与目标函数之差或目标函数的倒数来表示。

在本文中，设计的适应度函数如式（4-3）所示：

$$Fit(X) = -f(X) = - \left[ \sum_{i \in |Z|} (R_i - W_i) + c_1 \sum_t \sum_q \sum_i (W_{q,i,t} Y_{k,i,t} \cdot |p_i - k|) + c_2 \sum_i N_i |b_i - p_i| \right]$$

公式（4-3）

#### 4.3.4 选择

选择的意思是在种群产生的子代中挑选出生命力更强、更能适应环境的个体作为新群体的过程。在遗传算法中，采用选择算子的目的是对子代个体进行优胜劣汰、适者生存的操作。其操作过程如下：根据个体的适应度值大小来选择，而适应度小的个体较之适应度大的个体难以适应环境，在选择过程中被淘汰，遗传进入下一代群体的机会较小；而适应度大的个体相对于适应度小的个体更容易适应环境，在选择过程中胜出，遗传进入下一代群体的机会大。通过一代代的遗传操作，选择优良个体进入进化过程，使得算法搜索更快的趋于全局最优解。使用好的选择算子比不恰当的运算算子能减少相似个体的大量产生，保证子代相比父代的优化，使种群个体更广泛，避免出现局部最优解<sup>[43]</sup>。下表4-1为常用选择算子及其特点。

表 4-1 常用的选择算子及特点

序号	选择算子名称	特点
1	轮盘赌选择 <sup>[44]</sup>	选择误差相对较大
2	锦标赛选择	减少轮盘赌选择方法的随机性
3	最优保留选择策略 <sup>[44]</sup>	将每一代适应度最高的个体保留下来
4	无放回随机选择	较少轮盘赌的随机性，操作不便
5	确定性复制	选择过程产生的误差相对较小，操作简单



6	柔性分段选择	通过人为选取参数,可防止基因意外丢失,但易受到人为因素影响
7	自适应柔性分段式动态群体选择	种群不易受外部影响,相对搜索效率较高
8	均匀排序	与适应度值是负与否无关
9	稳态复制	保留上一代群众中适应度较高的个体
10	随机联赛选择	选择过程与适应度函数值正负无关
11	排挤选择	可使得种群中的个体分散

轮盘赌选择方法主要内容是根据各染色体的适应度值,以每个染色体适应度值与种群适应度值总和的比率为概率,随机选择子代种群。轮盘赌选择法的优点是:能够根据得到的随机概率保证优先选择适应度值较大个体,同时还能给适应度值较小的染色体一些生存空间。但是,由于选择过程的随机性,可能使得适应度低的染色体被选择,而适应度较高的染色体一次都没有被选择。锦标赛选择方法能最大限度的保证优胜劣汰,适应度较小的个体更容易被环境所淘汰,然而正是由于适应度小的个体被淘汰的速度过快,而使得种群收敛速度过快出现早熟现象和种群的多样化也迅速减小。

考虑到各种选择方法的选择特点及优劣性,本文采用的是轮盘赌选择方法和最优保留策略相结合的方式。

采用轮盘赌选择的过程中,个体被选择概率与其适应度函数值高低成正比,适应度相对较高的个体相对于适应度较低的个体被选择的概率更大些,但并不代表适应度值低的个体没有被选择的机会。在实际操作过程中,由于选择概率的不确定性,且选择随机,便有可能会产生适应度较差个体被多次选中,而最优个体一次也没有被选中。因此在选择过程中要加入优胜劣汰的考虑,淘汰不良个体,增加最优个体被选中的概率,使得群体向着更优化的方向发展。选择过程如下:

为保留上一代中的最优染色体序列,让最优个体参与交配,以便生成更优个体。使用该选择方法,还需改进单独使用最优保留策略中的保存最优个体,要求  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_n$  都选择父代的最优个体。 $C_1$  不参与交配,用于保存父代的最优个体和完成优质的变异; $C_2$  则参与交配; $C_n$  按照交叉概率  $P_c$  参与交叉过程。

对于新的  $\{C_3, C_4, \dots, C_{n-1}\}$  个体群,采用轮盘赌方法选择,加入最优保留的策略,若选择到父代的最差个体,则放弃该最差个体重新选择。

4.3.5 交叉

遗传算法的交叉操作是对生物进化过程的模拟。交叉操作的过程是将父代中的两个染色体按一定方式交配，交换部分染色体形成两个全新个体。在遗传算法中进行交叉运算之前，还需要对种群中个体进行两两配对，本文采用随机配对策略<sup>[42]</sup>。

对于交叉操作，在本文中结合模型的特点，船舶的靠泊时间采用单点交叉运算，而靠泊位置和岸桥的数量采用算术交叉的方式。

单点交叉策略的操作过程为：在父代的第一行染色体中随机选择一个点，在这个点之前的基因继承父代1相同位置的基因，相应的这个点之后的基因继承父代2相同位置的基因，完成单点交叉操作。

算术交叉的操作过程为：指定一个参数 $\lambda$ ， $\lambda$ 是从0到1的随机数。通过两个父代染色体上基因的 $\lambda$ 线性组合产生子代个体基因，就是对靠泊泊位岸线位置和分配的岸桥数量分别进行 $\lambda$ 线性组合，如式（4-4）所示。

子代 =  $\lambda \cdot$  父代1 +  $(1 - \lambda) \cdot$  父代2

公式（4-4）

例如，第一行基因，对于靠泊时间，采用的交叉点为3，当 $\lambda = 0.5$ 时，交叉操作运算如图4-3所示。

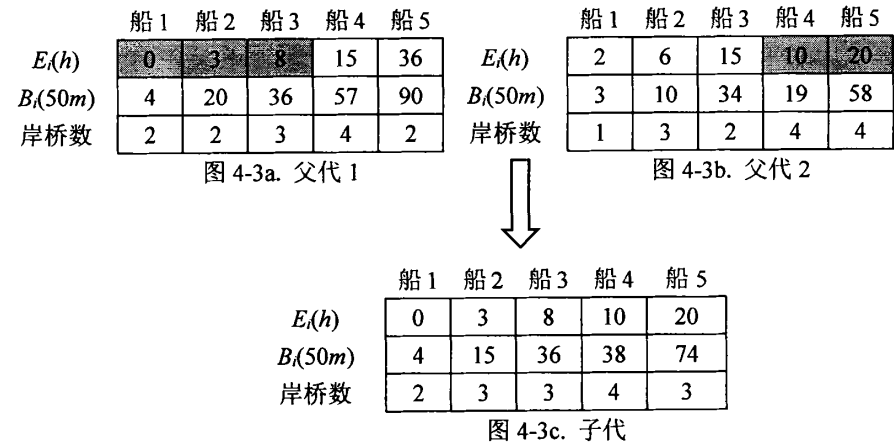


图 4-3 基因交叉操作示意图

4.3.6 变异

遗传算法的变异运算对生物遗传进化过程中变异环节的模仿的过程，其实是基因上的某一个或某些位置以较小的概率进行改变，发生突变，生成新的


个体。变异运算是对交叉操作的补充，对于局部的搜索有较高的能力，并且能防止算法发生早熟。对染色体进行变异操作的主要目的有：

(1) 提高局部搜索能力。交叉算子在遗传算法中的使用可以使得算法尽可能从全局的角度找到一部分较好的个体编码结构。但是仅仅依靠交叉运算无法对搜索空间内的细节进行局部搜索，使用变异运算是对交叉运算很好的补充，可以使得算法从局部角度对种群子代个体更加趋向最优解或满意解，增加局部搜索最优解的概率。

(2) 可防止早熟现象的发生。通过变异的操作，可使得子代个体中的某些基因位置的基因值发生变化。改变子代个体染色体的编码结构，从而维持种群的多样性，防止算法过程中出现过早搜索到局部最优解而停止运算的现象。变异算子的使用能够使得遗传算法在进行过程的后期结束收敛，防止发生算法早熟的现象。

对于变异方法，不同的编码方式有不同的变异方法，对于实数编码，常用的变异方法主要有非均匀变异、高斯变异和边界变异等方法；对于自然数编码，常用的变异方法有反转变异、换位变异和插入变异等。本文采用的是自然数编码方式，所采用的变异算子是换位变异算子。其操作过程是：随机选择两个基因，进行基因位置呼唤。互换之后还需判断互换后的染色体是否满足约束条件，会发现对于约束条件每艘船舶分配服务的岸桥数量不大于该船舶可接受的最多服务岸桥数不一定满足，需做一定的调整，如图 4-4 所示。

随机选择两个基因位置，交换其基因值



0	3	8	10	20
4	15	36	38	74
2	3	3	4	3

变异

0	10	8	3	20
4	38	36	15	74
2	4	3	3	3

调整

0	10	8	3	20
4	38	36	15	74
2	3	3	3	3

图 4-4 基因变异操作示意图

对于变异操作,是为了增加进行交叉操作运算之后的种群在迭代过程中的多样性。文中第一行和第二行基因按式(4-5)进行变异操作,其中  $r$  是一个(0, 1)的随机数,  $G$  为当前迭代次数,  $s$  是变步步长参数,  $\Delta$  为变动范围。

$$\text{子代} = \begin{cases} \text{父代} + \Delta \times \left(1 - r^{\left(1 - \frac{G}{p}\right)^s}\right), & r \geq 0.5 \\ \text{父代} - \Delta \times \left(1 - r^{\left(1 - \frac{G}{p}\right)^s}\right), & r < 0.5 \end{cases} \quad \text{公式 (4-5)}$$

染色体的第三行基因,即岸桥分配数量在  $[M_{\min,i}, M_{\max,i}]$  范围内随机取值作为自适应变异后的基因值。

标准遗传算法运算过程中的交叉概率是固定的,但是在进化的初期,个体之间差异比较大,个体经过交叉操作生成更好个体的可能性也更大,为加快进化过程,应当增大交叉概率,在进化的后期,个体之间差异较小,更应当增大交叉概率来使得相对较优的个体得到尽快的遗传。本文根据适应度值的大小,既要避免算法收敛与局部最优,也应当防止优良的基因收到破坏。这里采用改进后的多目标遗传算法<sup>[10]</sup>构造  $P_c$  和  $P_m$  自适应调节的表达式如下(4-6)和(4-7)所示:

$$\begin{cases} P_c = P_{c1} - \frac{(P_{c1}-P_{c2})(f_{avg}-f')}{f_{avg}-f_{max}}, & f' \geq f_{max} \\ P_c = P_{c1} & , f' < f_{max} \end{cases} \quad \text{公式 (4-6)}$$

$$\begin{cases} P_m = P_{m1} - \frac{(P_{m1}-P_{m2})(f-f_{max})}{f_{avg}-f_{max}}, & f \geq f_{avg} \\ P_m = P_{m1} & , f < f_{avg} \end{cases} \quad \text{公式 (4-7)}$$

式中:  $P_{c1}$ 、 $P_{c2}$ 、 $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$  分别为预先定义的参数;  $f_{avg}$  表示每代种群平均适应度值,  $f_{max}$  表示种群中最大的适应度值,  $f'$  表示交叉的两个个体中较大适应度值,  $f$  表示变异个体的适应度值。

#### 4.3.7 算法流程图

算法具体操作流程如图 4-5 所示。

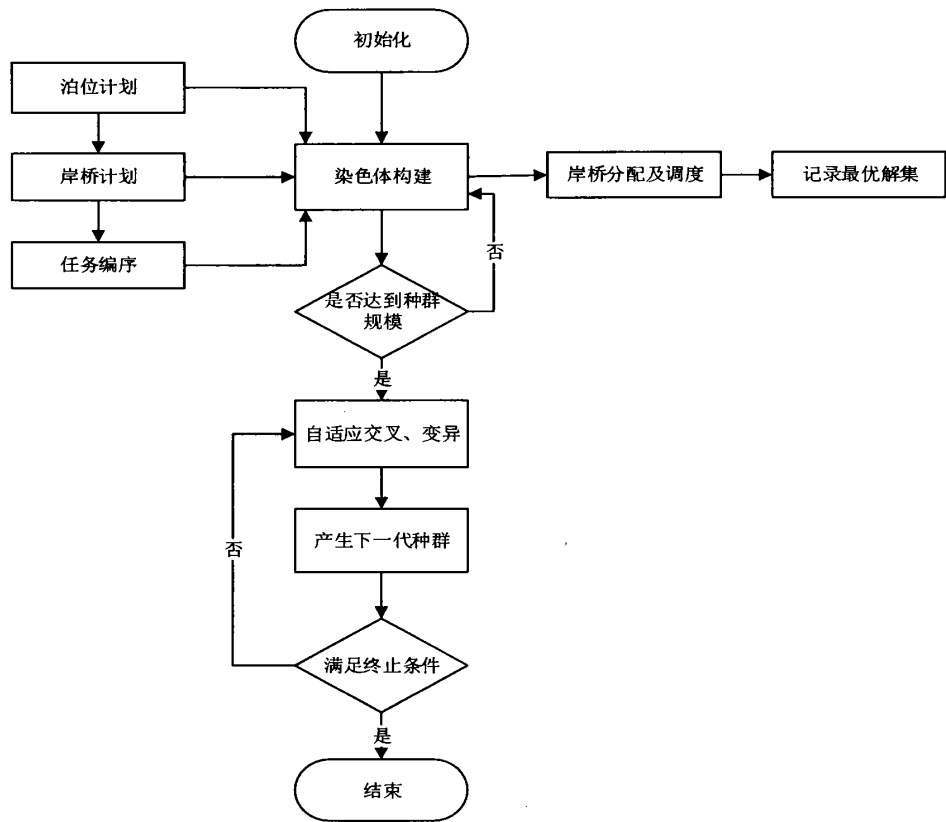


图 4-5 岸桥和泊位联合调度多目标遗传算法流程图

4.3.8 优解保存策略<sup>[45]</sup>

根据文献[45]中可知，文中采用的优解保存策略主要内容为：将第一代进化生成的  $n$  个解保存，并作为现有非劣解集。非劣解集的个数由多目标问题的特性和非劣解个数要求所确定，通常取种群个体总数的 5%~15%。后续每一代进化生成的最优的一系列解集与原有的非劣解集依据下式（4-8）：

$$f_i(x^*) \geq f_i(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{公式 (4-8)}$$

进行比较,将生成的更好的解集替换原有的非劣解集中的劣解。如此循环往复，在计算结束时所得到的所有解集就是算法中得到的最好的非劣解，从而构成模型求解的非劣解集。

4.3.9 终止条件判断

对于文中算法的操作，当后续所得解集变化不大或再没有更优化的解出现时，就是算法终止运算的时候。判断算法终止条件通常有三种情况：

- (1) 运算已经达到设置的收敛代数;
- (2) 各代所求出的解已达要求;
- (3) 已经达到算法运行之前预先设置的运算时间。

多目标遗传算法是通过多次迭代、反复进化逐步寻找最优解的搜索方法,在进行算法运行之前需要确定算法的终止条件。一般情况下,终止条件是规定算法的进化代数。在求解泊位岸线分配和岸桥调度模型时,本文以进化代数作为终止运算判断条件。



第五章 算例分析

本文将根据集装箱连续型码头的基础资料和港口实际往来船舶情况进行设计算例，进行动态分析，对该泊位调度与岸桥分配模型和应用多目标遗传算法求解的有效性进行评价。

5.1 算例建模

5.1.1 基础数据

某集装箱码头岸线长度为 1200m，该码头有 10 台岸桥可以使用，岸桥从左右编号，船舶以到港先后顺序进行编号，选取连续的 10 艘到港船舶基础数据。其中，船舶长度包括船舶之间的安全距离在内，计划期内到达港口的船舶信息如表 5-1 所示。

表 5-1 计划期内港口-船舶信息

船舶编号	到达时间(h)		船舶信息		
	日/天	小时	作业量(TEU)	偏好位置(m)	最大作业岸桥数(个)
1	第一天	01: 00	980	200	6
2	第一天	02: 00	1500	600	5
3	第一天	04: 30	860	400	5
4	第一天	07: 30	1000	800	4
5	第一天	09: 20	1100	1000	4
6	第一天	10: 30	900	800	5
7	第一天	12: 50	1620	200	7
8	第一天	15: 40	1030	400	6
9	第一天	17: 30	1500	600	6
10	第一天	19: 40	800	200	4
11	第一天	22: 00	860	800	4
12	第一天	23: 40	1500	1000	6
13	第二天	02: 40	1600	400	6
14	第二天	04: 50	600	200	4
15	第二天	06: 00	1045	600	5

另外，根据集装箱码头实际生产统计数据可得，文中相关数据取值如下：



- (1) 码头各岸桥单小时的装卸成本 $c_1$ 为 100 元/岸桥/小时;
- (2) 码头各岸桥装卸单个集装箱单位距离的运输成本为 0.01 元/箱/米;
- (3) 单个岸桥的作业效率为 35 箱/小时。

### 5.1.2 实例模型

将已知数据带入模型 3-1 和 3-2 中, 可得到如下实例模型:

$$F_1 = \text{Min} \sum_{i=1}^{15} (R_i - W_i) \quad \text{公式 (5-1)}$$

$$F_2 = \text{Min} [100 \sum_t \sum_q \sum_i (W_{q,i,t} Y_{k,i,t} \cdot |p_i - k|) + 0.01 \sum_{i=1}^{15} N_i |b_i - p_i|] \quad \text{公式 (5-2)}$$

## 5.2 算例求解

本文采用 MATLAB2010<sup>[46]</sup>编写程序, 控制参数如下:

- (1) 种群规模 Pop=800;
- (2) 迭代次数 T=1000;
- (3) 选取交叉概率 $P_c = 0.8$ ;
- (4) 选取变异概率 $P_m = 0.1$ ;

经过计算机迭代运算, 经算法迭代 500 次运行结果如图 5-1 所示。

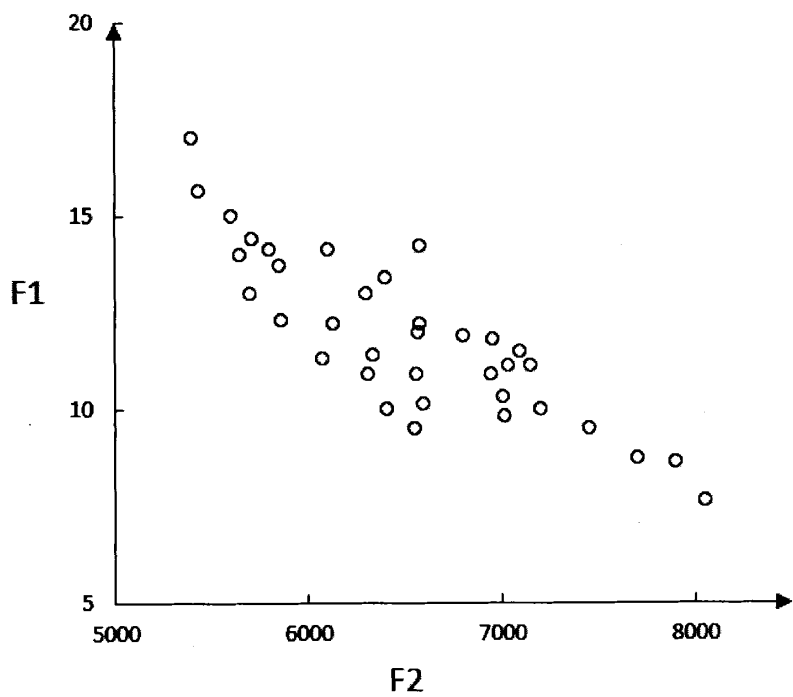


图 5-1 500 次迭代图

经算法迭代 1000 次的运行结果如图 5-2 所示：

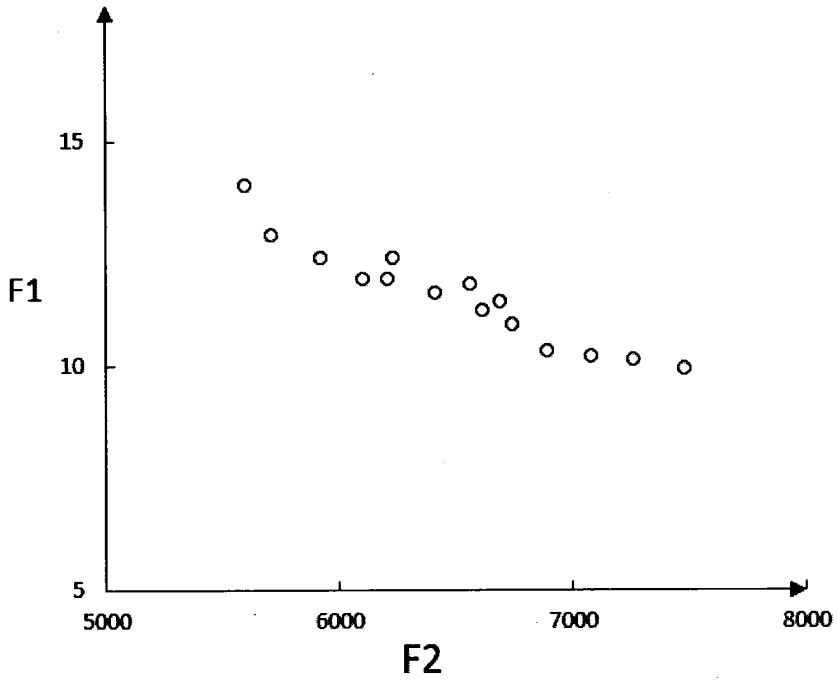


图 5-2 1000 次迭代图

经过 1000 次迭代所得到 Pareto 最优解集，如表 5-2 所示，文中列出前十种方案。

表 5-2 1000 次迭代所得 Pareto 最优解集

方 案	决策	到港船舶															F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	h	¥
1	Z	1	2	3	5	6	9	7	8	4	10	12	13	11	14	15	10.3	7117
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	9	6	3	3	12	9	6	3	9	6	12		
	Q	5	5	4	6	5	5	5	4	5	5	4	6	4	4	4		
2	Z	2	1	4	3	5	6	7	12	11	9	14	15	13	10	8	13.6	5980
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	9	6	3	12	6	9	12	3	9	6	12		
	Q	3	3	4	3	3	4	4	3	5	3	2	4	3	2	4		
3	Z	1	2	3	6	4	5	9	10	8	11	7	12	14	13	15	12.0	6767
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	6	8	6	3	12	6	9	12	3	9	12	6		
	Q	4	6	3	6	4	3	5	6	3	3	4	5	3	6	2		
4	Z	1	2	3	4	6	5	7	9	8	10	11	12	13	14	15	10.9	6182
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	3	6	9	12	6	3	12	9	6	8	3		
	Q	3	6	6	4	3	3	5	6	3	3	4	5	3	6	2		
5	Z	1	2	3	4	7	5	6	8	12	11	9	10	14	15	13	11.5	6491
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	3	12	9	6	12	3	6	9	12	6	3		
	Q	4	5	5	3	5	4	4	3	4	6	3	4	5	6	4		
6	Z	1	2	3	5	4	7	6	9	10	8	12	13	11	15	14	11.2	7272
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	3	12	6	9	3	12	9	3	6	9	12	6		
	Q	3	4	4	6	5	3	5	4	6	6	3	3	5	4	5		
7	Z	1	2	3	5	7	4	10	6	11	8	9	13	12	15	14	11.2	7419
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	6	9	3	12	6	9	3	12	9	6	3	9	12	6		
	Q	3	4	5	6	5	4	5	4	4	6	6	3	3	5	4		
8	Z	1	2	3	4	6	8	9	7	5	10	12	11	14	13	15	11.4	7097
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	9	6	3	12	6	3	8	9	12	6	3		
	Q	4	4	5	6	5	4	5	4	3	4	4	6	3	3	3		
9	Z	1	2	3	6	4	5	9	10	8	11	7	12	13	14	15	11.9	6950
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	9	6	9	3	6	9	12	3	9	12	6		
	Q	4	6	3	6	4	3	5	6	3	3	4	5	3	6	2		
10	Z	1	2	3	5	6	7	4	9	10	11	8	12	13	14	15	11.4	7000
	b <sub>i</sub> /10 <sup>2</sup> m	3	9	6	12	9	3	6	9	12	6	3	9	12	6	9		
	Q	4	5	4	3	4	3	3	4	5	5	3	5	6	3	6		

基于港口方面的考虑，从得到的十个 Pareto 最优解集中取港口码头服务成本最少的当作最后的解。由此，可以发现方案 2 使得总目标最优。此时的调度方案，如表 5-3 所示：

表 5-3 最优调度方案

船舶	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Z	2	1	4	3	5	6	7	12	11	9	14	15	13	10	8
$b_i/10^2\text{m}$	9	3	6	12	9	6	3	12	6	9	12	3	9	6	12
Q	3	3	4	3	3	4	4	3	5	3	2	4	3	2	4

在此调度方案下，虽船舶在港逗留时间和码头服务成本没有达到最低，两个目标函数没有同时达到最优。但综合考虑，从港口角度出发，已是最优结果。为直观表达方案 2 中最优泊位分配与岸桥调度情况，下面绘制了船舶作业泊位-时间坐标示意图，如图 5-3 所示：

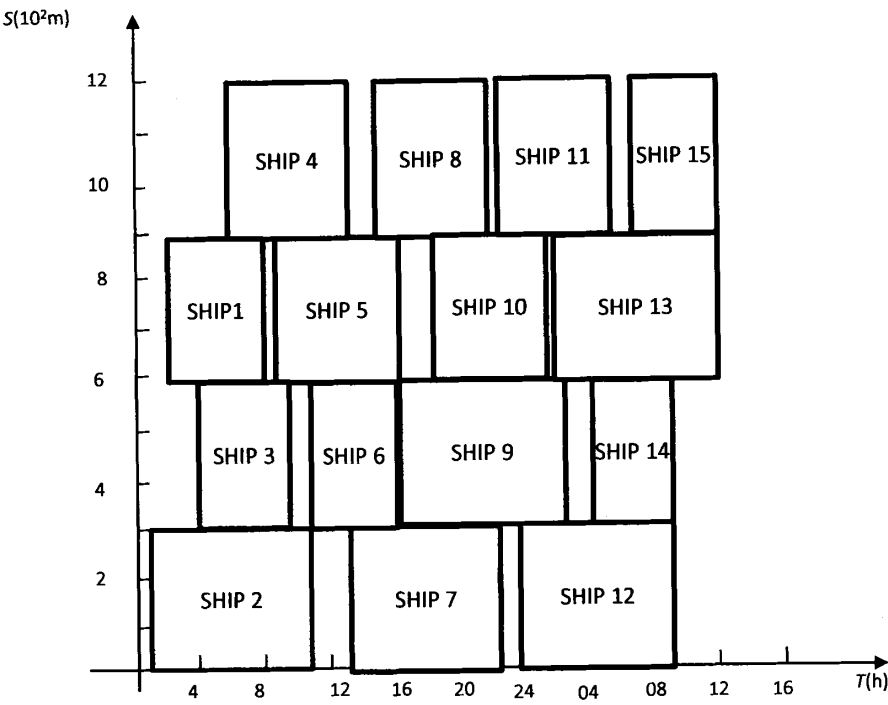


图 5-3 最优方案泊位-时间坐标系示意图

## 第六章 结论与展望

### 6.1 总结

在集装箱码头泊位分配和岸桥调度中,按照原计划有序运行是生产工作过程中的最佳状态,但是由于各种不确定性因素的影响,如天气因素、设备故障等,原计划可能就会被打乱。本文从港口企业和船舶公司的双方出发,结合实际情况,建立船舶停泊后泊位调度和岸桥分配的优化模型,并采用加入自适应机制的多目标遗传算法进行优化求解。通过泊位和岸桥的协调调度,本文将泊位的分配和岸桥的调度看成一个整体,意在找到一个各船舶在港时间的平衡点,通过合理的调度和分配,充分考虑港口的成本和船舶的总在港时间,达到保证船舶公司和港口的双方利益的目的。

在国内外泊位分配和岸桥调度研究的基础上,本文通过对泊位分配问题及岸桥调配问题影响因素的分析和研究,在码头岸边资源一定的情况下,通过合理的泊位分配和岸桥调度,将连续型集装箱码头和岸桥看成一个同时进行分配调度的整体,选取以船舶在港时间最短和码头服务成本最低为多目标的多目标优化模型。并通过多目标遗传算法对模型进行求解,主要的研究内容为:

(1) 对于目前集装箱码头的广泛应用程度的现实,分析我国在集装箱码头岸边资源整合和利用方面的不足,引出本文研究的意义。充分结合对国内外的研究现状研究,对本文的研究内容和方法进行概述。

(2) 结合实际情况,对集装箱码头布局及各岸边资源进行介绍,对集装箱码头泊位分配和岸桥调度的相关问题进行了分析,对集装箱船舶靠泊接收服务的流程及特点进行研究。对岸边资源协同作业特点进行说明,并对文章的主题思想进行阐述。

(3) 对集装箱码头船舶来往情况,并对解决问题所需的假设进行分析。结合前面对集装箱码头泊位和岸桥调度的实际问题分析,进而针对船舶泊位和岸桥分配调度问题提出数学优化模型。

(4) 设计了集装箱码头泊位分配与岸桥调度的多目标遗传算法的具体实现过程。通过对遗传算法和多目标遗传算法比较,说明选择多目标遗传算法的优点,并对模型进行求解。通过算例分析,结合往来港口船只的实际情况,对算例进行分析求解。

本文中的创新点主要体现在一下几个方面:

(1) 为了保证公平性,文中的集装箱码头在考虑船舶先后服务方式时,采用的是先到先服务的模式,并且将其作为一个约束条件因素加入到模型中,从

而保证了往来船舶的公平性，并通过目标最优确定船舶的靠泊方式，更符合港口实际情况。

(2) 列出了两个目标更具有实际意义。最小化船舶在港时间的成本和最小化港口服务成本，不同与以往很多学者关于最小化船舶等待时间或者港口服务成本最低的目标，更具有现实意义。文中站在港口公司的角度，在获得的 10 个 Pareto 最优解中选择港口服务成本最低的解，对于解的分析更具有客观性。

## 6.2 展望

本文在研究过程中，通过对相关文献的查阅和研究，针对集装箱码头连续型泊位分配和岸桥调度的实际问题，建立了含有两个优化目标的多目标优化模型，并采用加入自适应机制的多目标遗传算法进行求解。由于文章篇幅和水平有限，本文的研究只是将泊位和岸桥作为一个系统进行分配，并没有将船舶装卸的其他因素（比如集卡调度、堆场等）考虑在内，难免会有一定的局限性。在后续研究中，下面的问题有待进一步探究。

(1) 由于时间仓促，且资料收集不够完全，未来的港口进出口量也没有进行预测，可能会对集装箱码头的运营压力影响很大，没有考虑在内。

(2) 建立优化模型时，为了使得后面的求解过程简便和简化，由于一些数据的不稳定性，文中设置了一些假设条件。这些假设条件中的问题可以在以后的研究中深入研究，使得优化模型更接近集装箱港口的实际情况。且本文中所考虑的两个优化目标仍未能完全反映集装箱码头生产的全部决策需求。在制定泊位分配和岸桥调度方案时还需要考虑和集卡、后方堆场之间协调的问题。这些因素也一定程度上影响着码头的整体调度。

(3) 优化算法的改进。文中采用的带有自适应机制的多目标遗传算法，虽能在求解连续型泊位-岸桥调度问题上获得较好的优化结果，但鉴于集装箱码头实际生产调度的复杂性，随着优化算法的研究进步和计算机科学的发展，相信会出现更好的算法来求解该类多目标优化模型。

## 参考文献

- [1]余刘海, 庞洪静. 集装箱码头连续泊位与岸桥联合调度[J]. 科技信息, 2013 (09): 196-197.
- [2]赵坤强, 韩晓龙, 梁承姬. 连续泊位下集装箱港口泊位与桥吊协同调度优化研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (11): 60-65.
- [3]李娜, 靳志宏. 连续泊位调度与岸桥配置协同优化[J]. 中国航海, 2011, 34(02): 86-90.
- [4]欧阳玲评, 王锡淮, 肖健梅. 改进蚁群算法在泊位连续化调度问题中的应用[C]. 中国智能自动化会议论文集, 2009.
- [5]Park Young, Man, Kim, Kap Hwan. A Scheduling Method for Berth and Quay Cranes[J]. Or Spectrum, 2003, 25 (01): 1-23.
- [6]Meisel F, Bierwirth C. Heuristics for integration of crane productivity in the berth allocation problem [J]. Transportation Research Part E, 2009, 45 (01): 196-209.
- [7]Daganzo C. F. . The crane scheduling Problem[J]. Transportation Research B Methodological, 1989, 23 (03): 159-175.
- [8]Lim A. The Berth-Scheduling problem[J]. Operations Research Letters, 1998 (22): 105-110.
- [9]侯宁, 文元桥, 江福才. 码头泊位优化设计探讨[J]. 航海工程, 2007, 36(05): 96-98.
- [10]韩晓龙, 王正君. 集装箱港口岸边资源优化配置研究[J]. 现代商贸工业, 2012, 24 (14): 57-59.
- [11]韩笑乐, 陆志强, 奚立峰. 具有不同服务优先级别的动态离散泊位调度优化[J]. 上海交通大学学报, 2009, 6 (06): 902-905.
- [12]李强, 杨春霞, 王诺, 佟士祺. 集装箱码头泊位生产调度均衡优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24 (06): 1132-1136.
- [13]Edmond E. D. , Maggs R. P. . How useful are queue models in port investment decisions for container berths [J]. Journal of the Operational Research Society, 1978, 29 (08): 741-750.
- [14]Lai K. K. , Shih K. . A study of container berth allocation [J]. Journal of advanced transportation, 1992, 26 (01): 45-60.
- [15]Imai A. , Nagaiwa K. , Tat C. W. . Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia [J]. Journal of Advanced Transportation, 1997 (31): 75-94.
- [16]Imai A. , Nishimura E. , Papadimitriou S. . The dynamic berth allocation problem for a container port [J]. Transportation Research Part B, 2001, 35 (04):



401-407.

[17] 靳志宏, 李娜. 连续泊位调度与岸桥配置协同优化[J]. 中国航海, 2011, 34 (02): 86-90.

[18] 韩晓龙, 丁以中. 集装箱港口泊位配置优化[J]. 系统管理学报, 2006, 15 (03): 275-278.

[19] 蔡芸, 张艳伟. 集装箱码头泊位分配的仿真优化方法[J]. 中国工程机械学报, 2006, 2 (02): 228-232.

[20] 韩骏, 孙晓娜, 靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34 (02): 117-121.

[21] Li C. L. , Cai X. , Lee C. Y. . Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern[J]. IEEE Transactions, 1998, 30 (05): 433-455.

[22] Liang C. , Huang Y. . A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56 (03): 1021-1028.

[23] Schaffer JD. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms[M]. Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1985.

[24] Goldberg D. E. . Genetic algorithm for search, optimization and machine learning[M]. Publisher: Addison-Wesley, 1986.

[25] Zhang Q. , Li H. . MOEA/D: a multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 11 (06): 712-731.

[26] Tiwari S. , Fadel G. , Deb K. . AMGA: an archive-based micro genetic algorithm for multi-objective optimization[J]. Conference on Genetic & Evolutionary Computation, 2008: 729-736.

[27] Tiwari S. , Deb K. , Fadel G. . AMGA2: improving the performance of the archive-based micro-genetic algorithm for multi-objective optimization[J]. Engineering Optimization, 2011, 43 (04): 377-401.

[28] Bader J. , Zitzler E. . HypE: an algorithm for fast hyper-volume-based many-objective optimization[J]. Evolutionary Computation, 2011, 19 (01): 45-76.

[29] While L. , Bradstreet L. , Barone L. . A fast way of calculating exact hyper-volumes[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2012, 16 (01): 86-94.

[30] Deb K. . Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[J]. Chichester: John Wiley & Sons, 2001, 2 (03): 509.

[31] Steuer R. E. . Multiple Criteria Optimization: theory, computation, and applications[M]. New York: Wiley, 1986.

- [32] Marglin S. . Public investment criteria: benefit-cost analysis for planned economic growth[M]. M. I. T. Press, 1967.
- [33] Y. Haimes. Integrated system identification and optimization[J]. Control and Dynamic System: Advances in Theory and Application, 1973 (10): 435-518.
- [34] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [35] 孙关龙. 达尔文进化论的五大缺陷[J]. 科学中国人, 2001 (07): 24-27.
- [36] 王小平, 曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [37] 史峰, 王辉等. Matlab 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [38] Coello Carlos A. . A comprehensive survey of evolutionary-based multi-objective optimization techniques[J]. Knowledge and Information Systems, 1999, 1(03): 269-308.
- [39] 张长胜. 多目标人工蚁群算法及遗传算法的研究与应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2013.
- [40] Hee K. M. V. , Wijbrands R. J. . Influence of sprint speed and body size on predator avoidance in New Mexican spadefoot toads (*Spea multiplicata*) [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 34 (09): 262-274.
- [41] 陈国良等编著. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [42] Dorigo. Improved multi-objective PSO algorithm for optimization problems [J]. Journal of the Operational Research Society, 2007, 48 (02): 151-161.
- [43] 杨平, 郑金华. 遗传选择算子的比较与研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43 (15): 59-62.
- [44] 李学强, 郝志峰, 黄翰. 基于分方向选择搜索的多目标进化算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39 (02): 130-135.
- [45] 蓝艇, 刘士荣, 顾幸生. 基于进化算法的多目标优化方法[J]. 控制与决策, 2006, 21 (06): 601-605.
- [46] 雷英杰, 张善文, 李续武等. 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.



## 发表论文和参加科研情况说明

发表论文情况:

[1]汤齐, 滑建辉. 连续型泊位与岸桥配置的多目标问题求解[J]. 天津大学学报 (社会科学版). 2016, 18 (01): 44-49.



## 致 谢

时光荏苒，岁月如梭，转眼即将毕业。经过几个月的努力，毕业论文也终于完成了，在这几个月中，我学到了很多的东西，尤其是港口方面的知识，同时我还深深的认识到，自己所学的知识还很有限，还有很多深层次的问题值得我去探究，去寻找答案。在此，衷心谢谢一直给予我很大帮助的导师——汤齐教授！

从开始写开题报告的时候开始，老师就细心的为我指导论文方向，积极为我提供参考资料，在我遇到困难的时候也是尽最大努力帮我解决。研究生阶段，从汤齐导师的身上我学到了很多，不论是学术方面，还是做人方面，他都是值得我学习的榜样。不论是生活上还是学习上，当我迷茫不知所措时，汤老师一直给我最大的鼓励和支持，帮我从困惑中走出来，帮我解决了很多问题。汤老师严谨的治学态度，豁达的性格非常值得我去学习，是我在研究生阶段获得的很大一笔财富。

在这里我要感谢我的家人，是他们在背后一直辛勤努力，供我读书，使我有机会读研，而且在我有困难的时候，他们也会积极询问，尽全力帮我解决。

还要感谢我的同学，在研究生阶段，给了我一个很好的生活和学习环境，和他们一起生活，一起奋斗，是这一辈子都值得回忆的事情。

另外还要感谢我的母校——天津工业大学，给了我一个读研的机会，使我能够学到那么多的专业知识。

最后，感谢评阅本文的老师，谢谢你们能够在百忙之中抽出宝贵的时间审阅我的论文，更感谢老师们提出的宝贵意见，我一定谨记于心并努力完善修改，再一次表示感谢！

