

分 类 号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151 _____

大 连 海 事 大 学

工程硕士学位论文

基于进化策略算法的港口拖轮调度优化

(学位论文形式：应用研究)

周 晓 光

指导教师	李伟	职称	教授
------	----	----	----

学位授予单位	大 连 海 事 大 学
--------	-------------

申请学位类别	工程硕士	工程领域	交通运输工程
--------	------	------	--------

论文完成日期	2014 年 9 月	答辩日期	2014 年 11 月
--------	------------	------	-------------

答辩委员会主席





**The Port Tugboat Scheduling Optimization Based on
Evolutionary Strategy Algorithm**

A thesis Submitted to

Dalian Maritime University

In partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Engineering

by

Zhou Xiaoguang

(Communications and Transportation Engineering)

Thesis Supervisor: Professor Li Wei

September 2014

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“基于进化策略算法的港口拖轮调度优化”。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：周晓光

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：周晓光 导师签名：李

日期：2014年11月12日

摘要

港口是具有水陆联运设备和条件，提供船舶安全进出和停泊的运输枢纽。随着全球经济的复苏，港口的发展正成为国家经济飞速发展的重要环节。目前，我国港口发展仍处于利润理念阶段，利润最大化仍是国家战略发展的需要。因此，在以利润最大化为前提下，如何提高港口的服务能力和管理能力将成为现代港口发展的关键。拖轮作业是港口生产中的“第一站”，合理的拖轮调配将节约港口生产成本，提高港口作业效率，为港口物流体系发展提供最有利的保障。

在拖轮实际作业生产中，拖轮调度的优化体现在如何节约生产成本以及提高拖轮的使用效率。然而，生产成本和生产效率是两个相互矛盾的因素。同一生产任务，如果拖轮马力小，单位时间内生产成本低，但拖轮作业周期长，生产效率低。如果拖轮马力大，单位时间内生产成本高，但拖轮作业周期短，生产效率高。因此，在拖轮作业调度过程中，我们不能简单的考虑生产成本和生产效率两者之间的反向关系，而应试图通过深入的研究生产效率与生产成本两种影响因素的复杂关系，来合理的优化拖轮作业，找到解决最佳方案。

同时，在拖轮作业的实际调度中，考虑到进出港口船舶的船长是随机的，并且为靠离泊船舶提供作业服务的拖轮数量和马力是有相应匹配要求的。因此，本文将根据大连港大窑湾作业区域实际情况，结合大连港轮驳公司拖轮调度数据，基于带有特殊工艺约束的并行多处理任务调度理论，以完成作业效率和完成作业成本双目标最小化为目标，对拖轮作业调度问题进行建模分析。在此基础上，设计进化策略与局部搜索相结合的混合算法，并对进化策略算法的编码和解码、重组算子和变异算子进行设计。

混合算法在设计上满足了拖轮实际作业中的工艺约束条件。在实际的拖轮作业过程中，通过对生产效率和生产成本两个因素的权重值进行适当调整，可以得到拖轮作业合理调度的最优解。最后，经过最优解与仿真计算的结果比较验证了混合算法的有效性和实用性。因此，在实际的生产中运用混合算法优化调度作业，将对拖轮合理调度具有一定的指导性和应用意义。

关键词：拖轮调度；作业效率；作业成本；进化策略算法；混合算法

ABSTRACT

Port which own equipment and conditions of water-land shipment is the transportation hub of providing ship safety in and out. With the global economic recovery, the development of the port is becoming an critical part of rapid economic growth in China. Port development is still in the stage of profit, profit maximization is the request of national strategy development. Hence, the profit maximization as the premise, how to improve the port service capability and management skills will become a key of modern port development. Tugboat operation is the "first" in the port production. Reasonable tugboat deployment will reduce cost and improve the efficiency of port operation so that it will provide the best guarantee for port logistical system.

In the actual tugboat operation, the port tugboat operation scheduling optimization depend on how to save production cost and how to improve the use efficiency of tugboat. However, production cost and production efficiency are two contradictory factors. In the same production task, if using the small horsepower tugboat, unit-time production cost is lower than large horsepower tugboat, but the tugboat operation cycle is long so that the production efficiency is low. On the contrary, if using the large horsepower tugboat, unit-time production cost is higher than small horsepower tugboat, but the tugboat operation cycle is short so that the production efficiency will improve. Therefore, in the tugboat operation scheduling process, we shouldn't simply consider the inverse relationship between production cost and production efficiency, but try to analyze deeply the complex relationship of two influence factors. Thereby giving a reasonable solution to optimize tugboat operation.

Meanwhile, in the tugboat operation scheduling, considering the captain of the in and out of ship is random, and the number of tugboat and the horsepower need to match demands .As a consequence, according to the actual situation of Dayaowan operational zone in Dalian port, combined with the tugboat scheduling data from Dalian harbour tug&barge corporation, based on the parallel task scheduling theory with special process constraint, in order to reach the minimized aim of improving production efficiency and saving production cost. The article will apply with the modeling analysis approach to solving tugboat operation scheduling issues. On the basis of this, design of hybrid algorithms, combined with evolutionary strategy algorithm and local search

algorithm, and evolutionary strategy algorithm of coding and decoding, recombination operator and mutation operator can be designed.

Hybrid algorithm are designed to meet the process constraints. In the actual tugboat operation process, we can adjust the weight ratio of the production efficiency and production cost so that we can get the reasonable scheduling solution. Finally, though the optimum solution compared with simulation calculation results verify the validity and practicability of the hybrid algorithm.

Therefore, in the actual production operation, using the hybrid algorithm to optimize tugboat operation, it is essential and significant.

Key Words: Tugboat scheduling; Production efficiency; Production cost; Evolutionary strategy algorithm; Hybrid algorithm

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究的背景	1
1.2 研究的目的和意义	2
1.2.1 现代物流对我国港口发展提出的新要求	2
1.2.2 拖轮作业在港口生产中的作用	3
1.2.3 实际作业生产中合理的调配拖轮的重要性	4
1.2.4 运用进化策略算法优化拖轮调度作业	5
1.3 国内外研究动态	6
1.4 本文研究内容	7
第 2 章 进化策略算法的理论基础	9
2.1 进化算法的产生和分类	9
2.1.1 进化算法的产生	9
2.1.2 进化算法的分类	10
2.2 进化算法的主要特点和发展趋势	10
2.2.1 进化算法的主要特点	10
2.2.2 进化算法的发展趋势	11
2.3 进化策略算法的产生和发展	11
2.4 进化策略算法的基本原理	12
2.5 进化策略算法的特点	13
第 3 章 拖轮调度系统的进化策略算法设计	15
3.1 拖轮作业调度系统的基本结构	15
3.2 拖轮作业调度系统进化策略算法的设计	17
3.2.1 考虑拖轮调度双目标优化建模	17
3.2.2 基于进化策略的混合算法设计	19
第 4 章 基于进化策略算法的模型计算	23
4.1 进化策略算法的实证分析	23
4.2 结果分析	25
第 5 章 结论与展望	27
参考文献	28
致 谢	32

第 1 章 绪论

1.1 课题的研究的背景

港口是具有水陆联运设备和条件供船舶安全进出和停泊的运输枢纽。港口作为交通运输系统的重要组成部分，同时也是水陆交通的集结点。随着国际化的逐步推进，港口正成为国际物流系统的重要环节，是工农业产品和外贸进出口物资的集散地，同时也是船舶停泊、装卸货物、上下旅客、补充给养的场所^[1]。由于港口是联系内陆腹地和海洋运输的一个重要平台，所以在整个物流供应链体系中起到链接的作用。港口物流产业正对整个国民经济、国家的战略发展产生着巨大的影响。港口的服务也给区域经济和城市化建设发展提供保障。

大连港一直以来围绕着“以港兴市，产业报国”的理念，正积极打造活力四射，多元并进的全方位港口，正在全面构建港口物流、工商贸服务、临港产业、金融和港口建设五大业务板块，努力建设多功能、现代化的国际强港，打造幸福型、创新型、生态型、高效型、智慧型的“五型”企业。在辽宁省和大连市政府的全力支持下，目前大连港的集装箱业务保持高速增长的势头，并始终保持外贸集装箱运输业务在全东北地区的主导地位，年外贸集装箱吞吐量占中国东北部港口外贸集装箱总吞吐量的 94%以上，同时内贸集装箱运输业务也正随着国内贸易的蓬勃发展而加快崛起^[2]。

在地理位置和自然条件方面，大连港处于渤海湾入口的战略位置，与主要的国际航线毗邻，同时港口水域条件优越，常年不冻不淤，是天然的深水良港，因而深受船舶运营商的青睐。港口各类码头水深及作业条件非常优越，可满足不同类型船舶的靠离泊需要，并具有接纳大型船舶的能力，如超大型油轮及第五代以上集装箱船舶。在大连港五大港区中，大窑湾港区位于大连大孤山半岛以东，大孤山半岛与大地半岛之间的整个港湾，是大连港集装箱中转运输基地、商品汽车中转运输基地、现代综合物流服务中心和重要的国际航运商务服务中心。港区内拥有专业化集装箱泊位 13 个，年通过能力 900 万 TEU，集装箱码头可靠泊装载能力为 15 万吨级的集装箱船舶，共拥有集装箱班轮航线百余条，其中远洋干线近 20 条，平均每周航班密度 120 余班，航线网络覆盖全球 100 多个主要港口。如今，

已与超过 50 家船公司建立了稳健的业务联系^[3]。

为保证大窑湾港区集装箱业务的快速、有序的进行,就必须以完善的港口服务为依托并优化相关的服务业务,其中主要的服务业务包括物流服务、仓储服务和拖轮协助等业务。拖轮协助是指按照港口的相关规定在集装箱船舶靠离泊过程中需要拖轮进行协助作业,对于不同船长的集装箱船舶与相应数量和马力的拖轮配置相对应。为保证良好的经济效益,在大窑湾区域内 13 个专业化的集装箱泊位必须全天不间断的进行港口作业,包括集装箱船舶的靠离泊和装卸货服务。所以在此基础上,集装箱船舶在拖轮协助的情况下快速有效的靠离泊或移泊作业显得尤为重要。因此在拖轮数量和总马力有限的情况下,不能合理的调度拖轮将直接影响港口的生产和管理,导致集装箱船舶的靠离泊时间延长和靠离港顺序变化。大窑湾港区大部分的集装箱船舶以班轮为主,港口效率对于船公司和货主都至关重要。从大窑湾港区的实际情况出发,当靠离泊船舶数量超过拖轮生产能力时,因为港区内可以协助作业的拖轮数量是有限的,总马力数是有限的。为了最大程度的保证生产的进度,合理的安排拖轮的马力组合和作业顺序,对如何调度拖轮作业的提出了合理优化的要求。

1.2 研究的目的是和意义

1.2.1 现代物流对我国港口发展提出的新要求

我国的港口物流在经济全球化的大背景下,新的经济环境对港口物流运营提出了新的要求。从我国目前的港口物流运营状况来看,在客户服务理念、建设一体化计算机操作平台、企业战略设想等方面还有待发展,在发展的同时港口物流需要不断的完善其功能和服务理念。

其一,全新的服务理念是现代化物流对港口物流提出的新要求。目前,在我国港口对物流业的要求停留在利润理念阶段,对客户的服务意识相对淡薄。纵观发达国家的港口物流产业的发展,港口物流的发展过程由成本理念阶段发展成为利润理念阶段,最后发展成为综合物流服务理念阶段。其中当港口企业处于成本理念阶段时,港口企业通过降低生产成本的方式从而获取最大利润。如果港口企业得到充分的发展,使其处于物流服务理念阶段时,那么港口企业将向合理化经

营和管理的方向进行转变，同时除了对企业利润和效率的要求外还要强化对客户的服务意识^[4]。

其二，高新技术的应用是现代物流对港口物流产业运营提出的新要求。港口企业的现代化发展主要体现在对高新技术的运用；其中通过高新技术的应用、计算机一体化平台的建立使港口企业的运营水平和装卸工艺明显的提高，同时为了提高港口的整体运营效率将广泛的采用信息自动集成技术和电子数据交换技术。在未来，港口间的竞争焦点和日常管理的重要关键在于信息交换能力的强弱^[5]。

其三，全新的战略意识是经济的全球化对港口物流提出的新要求。国际多式联运是全球物流一体化的表现，其中各大航运公司现在正由传统海运承运人向提供综合物流服务的一体化承运人转变，将运输能力从海上向内陆和空中延伸，以达到运输系统内部的稳定性、可跟踪性和延续性。为了加速发展航运联营体和提高营运效益，现在港口的投资主体逐渐成为航运公司^[6]。

其四，淘汰的危机意识是航运联营体对港口物流提出的新要求。近年来为提高港口运营效率，全球各大航运公司都在组建战略联营体并将联营范围从港口延伸到陆上设施。全球战略的发展将促进港口两极分化的形成，这种两极分化的成因在于为降低大型船舶的运营成本，就必须选择能够进行全天候进出服务、具备快速装卸、通关、集疏储运与配送等综合能力的港口，所以全球战略联营体对拥有充沛运营能力和优越地理位置港口更加青睐，对优质港口的选择将更加集中^[7]。

1.2.2 拖轮作业在港口生产中的作用

拖轮（Tugboat）又称为拖船，是用来为船舶进出港口护航、协助船舶靠离码头、拖曳没有自航能力的船舶或作为救助海洋遇难船只的船舶。因为拖轮装有大功率的推进主机和拖曳设备，所以同时具有体积小、马力大、操作灵活等特点^[8]。

港口拖轮又称港作拖轮，主要为大型船舶提供进出港护航、无动力拖带、协助靠泊、引水员的接送等协助服务，其作业具有反应快速、操作灵活等特点。在港口服务业中起着关键性的作用。在协助大型船舶进出港护航时，拖轮可以为大型船舶提供动力支持和提前水域预警，起到保障航行安全的作用；在协助没有自航能力的船舶时，拖轮可以为其提供动力，也可以协助其靠离泊；在协助进出港口的大型船舶靠离泊时，拖轮给大型船舶提供额外的横向和纵向的助力，同时配

合船长和引航员对船舶进行安全快速地操作，给港口的安全生产带来了保证；在港口和锚地区域内，拖轮可以协助海上遇难船舶，执行助航任务、接送引航员、作为海上交通船等等。由于拖轮自身的特点，在使用上具有多样性，使其成为港口发展不可或缺的助力，也是其他类型船舶不可替代的。

1.2.3 实际作业生产中合理的调配拖轮的重要性

目前我国经济处于高速发展的时期，港口的发展还需借鉴发达国家的发展经验。就目前我国经济的发展阶段来看，我国港口还处于利润理念阶段，为了谋求更快的发展必须追求最大的利润，这也是国家战略发展的需要，这样就对港口提出了获得最大利润的要求^[9]。为了获得最大的利润就要从如何提高港口的效率和有效的降低作业成本两方面出发。一方面，建立港口一体化平台，使港口可以利用先进的技术整合资源，促使各部分更好的衔接和提高自身的生产效率。另一方面，在利用港口一体化平台提高自身的生产效率的基础上，合理的调配资源，节约生产成本。其中拖轮服务作为港口服务的一部分，也同时成为创造利润的一个重要环节。所以在实际作业生产中，拖轮调度的优化体现为如何在利润不变的情况下节约生产成本和提高拖轮的使用效率。

拖轮的生产成本主要集中在油耗成本（在本文不考虑人力成本、拖轮折旧费、维护保养船舶成本等）。油耗成本与拖轮马力和作业时间有关，单位作业时间拖轮的油耗与拖轮马力成正比，也就是说，工作时间越长，拖轮马力越大，拖轮作业用油量越大。所以按照靠离泊船舶类型以及相关配置要求，合理的搭配不同马力拖轮可以为港口节约生产成本。拖轮协助船舶靠离泊的作业时间与引航员、船长的业务熟练程度和拖轮马力有关（本文不考虑引航员和船长的业务熟练程度与作业时间的关系），拖轮马力大拥有动力方面的优势，在作业时可以减小作业时间。例如，大马力拖轮在协助船舶离港掉头时，可以缩短船舶的旋回圈，加快完成掉头速度并减少作业时间。同理在靠离泊作业中也可以加快靠离泊的速度并减少作业时间，例如在顶推靠泊时，如果遇见码头水流流速大的区域，大马力拖轮可以加快靠泊进程，提供足够的动力对抗流速对靠泊产生的干扰。马力大的拖轮与马力小的拖轮相比作业效率相对提高，间接的提高港口的工作效率，但随着作业拖轮马力增大的同时作业油耗成本也相应增加。因为每次作业的时间和作业情

况不同，所以拖轮在单次作业中的作业时间和油耗量是不确定因素，虽然随着作业时间的增加，作业的耗油量也会相应增加；但是在不知道港口生产需要拖轮作业时间和作业油耗量的最优关系时，就不能简单的按照减少拖轮作业时间或减小拖轮作业成本来优化生产的效率和成本问题，更不能以此来优化港口拖轮的调度问题。

拖轮作业是港口生产中的“第一站”，有着保证生产的重要作用，尤其在保证港口的不间断作业要求下，提高生产效率对港口的连续性生产至关重要。如果拖轮作业效率低，则无法满足到港船舶按时进行靠离泊作业，港口就不能进行正常的装卸作业，容易造成船舶压港的现象，导致港口的生产的停滞。所以在实际的作业中，拖轮作业的调配应充分考虑作业效率和成本的关系，通过合理的调度达到具体作业中效率最高化、成本的最低化的理想调配。但在现实工作中，很难达到这样的目标，本文将通过研究确立作业效率和作业成本的关系，并优化拖轮调度作业，使其达到提高拖轮作业效率，降低作业成本的要求。

1.2.4 运用进化策略算法优化拖轮调度作业

近几年以来，非传统调度问题即带有工艺约束的并行多机调度问题，正逐步成为港口生产调度领域研究的热点问题。多处理机调度问题是指在生产作业过程中，一个工件需要多台机械协调共同完成对其加工作业，目前可以找到的文献^[10]中研究最多的是的加工机械种类相同或者所有机械的加工能力相同。而在现在的实际生产作业中，加工机器的种类、加工机械的能力的差异产生了一定的限制，产生了生产作业中的工艺约束。

工艺约束主要集中的问题体现在加工机械的能力受限，加工机械和工件作业时是对应关系。但从实际的港口生产作业中知道，港口拖轮作业时是一种特殊的并行多机带有特殊工艺约束的调度问题，即工件与机械之间是一对多的动态匹配关系，需要多种不同类型的机械同时协调完成一个工件的生产工作。为了解决上述带有特殊工艺约束的并行多机调度问题，本文设计了基于进化策略的混合算法，并对算法中的编码方式、重组和变异算子进行了处理，同时还采用了相邻不同基因多次交换的局部搜索方法用来提高搜索效率。为了实现拖轮完成作业时间最短和作业生产成本最小的双目标设计了相关的评价函数，用以实现带有特殊工艺约

束的双目标并行多机调度优化^[11]。

1.3 国内外研究动态

对于港口如何合理有效的调度生产并组建一体化的专业平台，用此来提高港口生产效率和降低生产成本。这类港口优化问题一直以来都在被相关的港口企业、科研机构和咨询软件公司在研究，并努力的寻找一种可行的方法优化相关问题，但目前还没有找到一种完全适用于相关问题的解决方法。

近年来国内外的多位学者和教授为优化港口拖轮相关问题提出了很多优秀的研究方案，通过不同的方法对其进行了优化和改进。其中，张志华^[12]对港口拖轮配置问题进行了相关研究，建立了关于按照港口规模、作业需要等条件下的仿真模型，把模糊评判的方法运用到仿真模型中，并对港口拖轮配置的方案进行了优化，为港口拖轮配置提供了适用的决策方法。刘志雄，王少梅^[13]通过分析港口拖轮的作业过程和作业特点，在拖轮作业过程中运用离散仿真技术，建立了变服务台排队模型，此模型为港口企业如何合理的配置拖轮提供了相应的可行性方案。刘贵量^[14]通过对船舶操纵过程中不同型号的拖轮选用进行了研究，研究改变了不同型号拖轮选用的无序状况，使拖轮的对应船舶的选用更加合理。何涛，朱宏辉^[15]通过对拖轮调度的深入研究，建立基于遗传算法的调度模型，并在此基础上研发了相应的决策支持系统。Liu^[16]运用多处理器调度的理论，对拖轮调度问题建立相应的数学模型，并采用遗传算法对模型优化，但该优化方案未考虑拖轮为作业前的准备时间同时忽略准备时的作业成本问题。刘志雄^[17]通过实验证明如果想有效地提高拖轮利用率可以采用拖轮最短距离作业的原则来实现。国外学者 Kashan A.H.et al^[18]对于平行机台调度问题采用离散粒子群算法来求解。Pan.Q.K et al^[19]对于解决系统无等待作业调度问题采用离散 PSO 算法，并对实际生产有一定的指导作用。

综上所述，国内外的学者对拖轮作业调度研究还处于初级阶段，没有一个成熟、开放的系统以供使用。目前拖轮协助船舶靠离泊的操作和港口拖轮的合理化配置方面成为主要的研究方向；但是对拖轮作业调度方面的研究较少，特别是如何提高作业效率和降低生产成本的调度方案缺少详细的研究，缺少这方面的研究将不利于港口提升企业利润和提高生产效率。港口拖轮调度问题是带有特殊的工

艺约束的并行多机调度问题。随着港口规模的不断扩大，港口效率的快速提升，使得港口拖轮的数量相应增加，同样拖轮的调度问题就更加的复杂化，但是根据拖轮作业调度的数学模型而开发出的配套算法却没有相应的研究。现今港口拖轮作业的如何降低生产成本和提高效率就更需要拖轮调度的科学决策，本文的研究对实际的生产作业具有一定的指导性和应用意义，运用本文的方法可以在调度中达到成本和效率的平衡，最大程度的完善调度不足。

1.4 本文研究内容

拖轮作业调度问题是一种带有特殊的工艺约束的并行多机调度问题，由于涉及到拖轮按船长配置协助船舶作业情况和协助船舶进出港、移泊的时间是随机变化的。使拖轮作业调度优化问题难度变大，并且这类研究问题属于随机离散型动态系统问题。对于这类问题，使用传统的优化方法，如数学规划中的解析法、线性规划、非线性规划^[20]等，无法有效的解决复杂的随机性问题，因此，采用基于进化策略算法的调度优化研究是有效的解决问题的途径之一。

拖轮作业调度的合理性直接影响拖轮的作业效率和作业成本，还能对到港口船舶的靠离泊的效率和顺序产生影响。本文将以大连港大窑湾港区为研究区域，重点研究如何优化拖轮调度以此提高拖轮的作业效率和降低生产作业成本，使生产达到利润的最大化的同时还不能对港口的正常运转造成影响，保证港口的运转效率。

如果从“作业收入-作业成本=利润（实际收入）”可以得出，如果成本增加，利润就会减小。所以拖轮的调度应从利润的角度研究优化问题。拖轮的马力大小与单位时间的耗油量成正比，与完成作业时间成反比。也就是说，使用马力大拖轮作业可以缩短作业时间但作业成本高，例如，船舶在使用大马力拖轮协助掉头时，可以缩短船舶的旋回圈，减少掉头时间，使工作时间减少。使用小马力拖轮作业结论与之相反。现代港口进行一体化的建设是为了提高港口的服务效率，并保证港口作业的连续性使各部分合理的、快速的运转起来，这也是现代物流对港口服务提出的最重要的要求。拖轮作业提高靠离泊效率和使用率是从作业效率角度研究优化问题，所以提高拖轮的使用效率和降低生产成本是现代港口对拖轮服务提出的要求，也是优化拖轮作业调度的重要性的体现。

大连港大窑湾区域内只有一个拖轮基地，所以本文不考虑多基地之间调度和拖轮与泊位之间调度距离最短的相关调度问题。具体的研究内容如下所述。

本文拖轮作业调度优化问题主要研究两个方面。如何提高生产效率和如何降低生产成本。但从目前已知的调度系统中得知，调度指派拖轮作业时只单方面考虑拖轮作业收入的最大化，而不考虑拖轮作业效率和作业成本，这就会造成拖轮作业效率高、成本高或者作业效率低、成本低的现象。例如，在拖轮作业调度指派过程中，为了增加收入会指派按船长配置拖轮作业中马力最大的拖轮作业，这样按实际马力收费时，收入会增加，会提高效益。但是没有考虑生产成本，马力大的拖轮作业效率高，收益高，成本也高；但是没有确切的论证除去成本以后的实际收入是否增加，是否为了追求高效率生产造成效率浪费，效率浪费的同时也会使港口其他拖轮闲置时间过长，造成港口资源的浪费^[21]。以上这两点都是本文需要通过进化算法解决的问题，寻找拖轮作业效率和生产成本的最优解，优化拖轮作业调度方案使其可以为港口提供最佳的解决方案，使其可以兼顾作业效率和生产成本。

第2章 进化策略算法的理论基础

2.1 进化算法的产生和分类

2.1.1 进化算法的产生

进化算法 EA (Evolutionary Algorithms) 是以达尔文的进化论思想为基础, 通过模拟生物进化过程与机制的求解问题的自组织、自适应的人工智能技术。生物进化是通过繁殖、变异、竞争和选择实现的; 而进化算法则主要通过选择、重组和变异这三种操作实现优化问题的求解。

进化算法是一个“算法簇”, 尽管它有很多的变化, 有不同的遗传基因表达方式, 不同的交叉和变异算子, 特殊算子的引用, 以及不同的再生和选择方法, 但它们产生的灵感都来自于大自然的生物进化。与传统的基于微积分的方法和穷举法等优化算法相比, 进化计算是一种成熟的具有高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法, 具有自组织、自适应、自学习的特性, 能够不受问题性质的限制, 有效地处理传统优化算法难以解决的复杂问题^[22]。

进化算法是求解全局最优化问题的一种新型算法。由于传统优化方法通常要用相关函数的导数信息是由极限确定的, 只能反映相关函数的局部特性, 不可能反映距离当前解较远处函数的特性, 因此, 利用导数构造出的上述格式的算法只能求出局部最小值点(局部最优点), 难以求出函数的全局最优解。而在大量的实际问题中, 通常要求出全局最优点, 而且函数的一阶导数、二阶导数等信息不容易求得或无法求出, 这时, 传统优化方法要么无法使用, 要么难以求出全局最优解。如何设计一种有效的算法来解决这些实际问题是摆在我们面前迫切需要解决的问题, 也是对传统优化方法的一个很好的补充^[23]。

进化算法正是在这种背景下诞生的一种新型优化算法, 它是模仿遗传原理与生物进化而设计的算法, 也是一类随机搜索的优化算法。根据达尔文的进化论, 自然界的进化(演化)是一个优胜劣汰、适者生存的过程。这个过程对一种生物或者物种来说是适用的, 如对整个人类来说, 人类是不断在进步, 尤其聪明程度和健康程度都在不断提高, 即每一个体都是在不断改变自身特点以适应在自然界中的生存^[24]。因此, 整个种群(Population)的进化过程可以看成是一个不断优化

的过程。如何将这个过程抽象出来，建立起一个优化模型和设计一种优化方法，并利用计算机来模拟这个过程，就是进化算法需要解决的问题^[25]。它也是一种模拟生物进化过程和进化机制求解问题的自组织、自适应人工智能技术，该方法以体现种群搜索和种群中个体之间信息交换两大策略的交叉和变异算子为主，为每个个体提供优化的机会，从而使整个群体在优胜劣汰的选择机制下保证了进化的趋势^[26]。它采用某种编码来表示复杂的结构，并将每个编码称之为以一个个体。算法维持一定数目的编码集合称为种群，并通过对种群中的每个个体进行一些进化操作来模拟进化过程，最终获得一些具有较高性能指标的编码。

2.1.2 进化算法的分类

进化计算可以分为以下四类：遗传算法(Genetic Algorithms)、遗传规划(Genetic Programming)、进化策略(Evolution Strategies)和进化规划(Evolution Programming)。进化策略和进化规划在科研和实际问题中的应用越来越广泛，而遗传算法随着广泛的应用目前已经比较成熟。在进化规则和进化策略中主要的基因操作是选种和突变，而遗传算法的进化机制源于选种、交配和突变。就适应度的角度来说，进化规则和进化策略用于选择优秀的子代，而遗传算法用于选择优秀的父代。进化规则和进化策略着重于子代本身的行为特性，而遗传算法与遗传规划强调的是父代对子代的遗传链。为了省去了运作过程中的编码—解码手续更适用于连续优化问题，所以进化规则和进化策略一般都不采用二进制编码。遗传算法和进化规则强调对个体适应度和概率的依赖，而进化策略可以确定机制产生出用于繁殖的父代。此外，进化策略抽象为个体之间的相似，而进化规则把编码结构抽象为种群之间的相似。目前，进化策略和进化规则已应用于连续函数优化、模式识别、机器学习、神经网络训练、系统辨识和智能控制的众多领域^[27]。

2.2 进化算法的主要特点和发展趋势

2.2.1 进化算法的主要特点

进化算法的主要特点体现在以下两点。

其一：智能性。智能性包括自组织、自适应和自学习性等。算法利用进化过程中获得的信息自行组织搜索，又基于自然选择策略，即适者生存，不适者淘汰，

使适应值大的个体具有较多的生存机会^[28]。

其二：本质并行性。1. 内在并行性（Inherent Parallenism）。可在多台计算机上并行运行进化算法，运算结束时各机器交流信息，进行选择，再进行并行计算。2. 隐并行（Implicit Parallenism）。由于是群体方式搜索，它可在搜索空间内多个区域同时搜索，并交流信息，虽然每次只执行与群体规模 N 成比例的计算，而实质上已进行了比 $O(N)$ 高阶数的有效搜索^[28]。

2.2.2 进化算法的发展趋势

随着科学的进步，进化算法未来的发展趋势将在以下几个方面体现。

其一：理论方面。缺乏统一、完善的理论体系，主要在收敛性和收敛速度分析方面的成果还待完善。

其二：计算方面。如何设计有效的进化算法、如何评价算法的性能等还有待于进一步的研究。

其三：新的计算模型。目前实现的只有生物进化的一小部分模型，近年来有两个新的模型研究方向：模拟免疫系统的模型和 DNA 模型。

其四：进化优化。尽管已有很多优化方法，但在实际中需要优化的问题复杂多变，要想用一种方法解决所有的优化问题是不现实的，如何根据具体问题的特点来设计有效的进化方法，以提高计算速度和有效处理约束是十分重要的；同时，对已有的有效算法，寻找其适用的应用问题类型也是一个重要的研究课题。

2.3 进化策略算法的产生和发展

进化策略是最古老的演化算法之一，而且非常有效。它与遗传算法类似，但是它用实值参数代替二进制码，进化策略是 20 世纪 60 年代由柏林工业大学的 Rechenberg 和 Schwefel 提出来的（和遗传算法同时代提出）。进化策略的设计之初是想用来解决流体力学问题。Schwefel 把其成功应用与超音速两相喷扫嘴（Supersonic Two-Phase Flashing Nozzle）的形状优化。为优化喷嘴的形状，Schwefel 把通过管道各点的喷嘴直径作为编码。

早期进化策略的种群中只包含一个个体，而且只使用变异操作。在每一进化代，变异后的个体与其父体进行比较再选择两者之优。这一选择策略目前称为(1

十1)策略。(1十1)进化策略存在很多弊端,如有时收敛不到全局最优解、效率较低等。之后改进的进化策略有:($\mu+1$)进化策略,($\mu+\lambda$)进化策略,(μ,λ)进化策略。

2.4 进化策略算法的基本原理

在利用优化策略算法进行运算之前,建立一个初始种群P,包含 μ 个个体。从初始种群P开始,迭代计算一系列种群。在每一次迭代中,从当前代中产生 λ 个子代。在下面三种进化策略情况下,用三步计算产生一个子代:

1. ($\mu+1$)进化策略

- (1) 产生 μ 个个体组成初始群体。
- (2) 随机地选取一个个体用正态分布进行变异得一个后代。
- (3) 用后代取代群体中最差个体。

2. ($\mu+\lambda$)进化策略

- (1) 产生 μ 个个体组成初始群体。
- (2) 用交叉方法使两个个体产生一个后代,用变异由一个个体产生一个后代,共产生 λ 个后代。
- (3) 从($\mu+\lambda$)个个体中选出 μ 个最优者作为下一代群体。

3. (μ,λ)进化策略

- (1) 产生 μ 个个体组成初始群体。
- (2) 用交叉方法使两个个体产生一个后代,用变异由一个个体产生一个后代,共产生 λ 个后代。
- (3) 在新产生的 λ 个后代中($\lambda>\mu$)选取 μ 个最优者作为下一代群体。

在实际应用中都要进行具体的编码计算,因为本文使用($\mu+\lambda$)进化策略算法所以下面重点介绍此算法的计算步骤:

1. 基因编码。基因编码是进化策略算法用二进制字符串表达染色体问题。在此算法中使用二进制字符串表示遗传学中的染色体,此字符采用二进制码,在计算机操作中,表达为1或0,每个二进制字符串表示一个个体,每一代次中个体的集合称作群体。

2. 形成初始群体。在进化策略算法中,产生初始群体的方法通常采用随机挑选

的方法、即一组任意排列的二进制字符串随机生成。在此算法中，群体中个体的数目是固定的。

3. 基因交换。用基因交叉互换的方法使两个个体产生一个后代，为了改善总体的性能，可以通过对产生的新群体进行复制，产生的新群体作为下一代群体。

4. 基因突变。由基因变异通过一个个体产生一个后代，共产生 λ 个后代。为了方便计算机的计算，此算法采用模仿生物学中基因突变的方法，将个体字符串某位符号由 0 变 1 或 1 变 0 的进行逆变。

5. 算法终止。重复执行上述算法中的每一个步骤，直到得到需要的结果，即最优值^[29]。

2.5 进化策略算法的特点

进化策略算法(EA)在形式与基于导数的解析方法和其他启发式搜索方法一样是一种迭代方法。此算法采用种群搜索技术，首先采用类似于有性繁殖和自然选择的方式对当前种群进行基因改良，然后在改良后的优秀基因基础上，产生下一代解的群体，所以此群体将拥有更好性能指标。进化策略算法又采用随机搜索方法，采用已有的信息对种群进化到包含或接近最优解状态进行指导搜索，但是此方法必须建立在对染色体的评价和对染色体中基因的作用的基础上才能进行。在整个进化过程中，为了降低了对人机交互的依赖，进化算子在利用适合值作为度量运算指标的基础上对染色体进行随机操作，此算法全局搜索能力有极大的提高作用。此外，进化策略算法之所以成为一种具有可规模化和良好普适性的优化方法是因其信息处理的隐并性、固有智能性、应用的鲁棒性及操作的简明性等优点，但是进化策略算法的缺点是容易产生早熟收敛和收敛速度慢。

进化策略算法与传统的优化算法相比，其最主要的特点体现在以下五个方面：

其一：进化策略算法的搜索过程分为以下几个步骤，首先把一群初始点作为开始点，然后通过内部结构的调整原有的点，最后通过重组来形成新的点，在此过程中会出现多个近似解，这些近似解都由进化所得。上述说明，此方法适合多目标优化问题的求解。

其二：进化策略算法不需要像传统的优化方法采用目标函数的梯度等解析信息，只需要利用目标函数值的信息。因此它即具有良好的通用性也可以有效地用

于解决较为复杂的非线性优化问题。

其三：进化策略算法在对每一代的中只限对每个个体进行操作，但对于数据量的处理却为群体规模的高次方，所以进化策略算法具有显著的隐并行性。

其四：进化策略算法当同时在解空间的多个区域进行搜索时能以较大的概率跳出局部最优，而传统的优化方法对多峰函数的求解已陷入局部最优。

其五：进化策略算法在存在噪声的情况下，算法在速度和效益之间的权衡使得它能适应不同的环境并取得较好的结果或者对同一问题的进化算法在多次求解中得到的结果是相似的，所以进化策略算法具有很强的鲁棒性^[30]。

第 3 章 拖轮调度系统的进化策略算法设计

在港口拖轮作业过程中，由于到港船舶的船长是随机的，并且为其提供靠离泊作业服务的拖轮的数量和马力是相应匹配的，相对而言也是随机的、动态的，所以把这类生产调度问题可以作为并行多机调度问题来研究，对于这类调度问题，难以用确定性的数学模型进行计算，更难以采用传统的确定性方法进行优化。并行多机调度问题是指一艘船舶靠离泊需要多艘拖轮协助作业的问题，在作业过程中为靠离泊船舶提供作业服务的拖轮的数量和马力是相应匹配的，这也是带有一定工艺约束的调度问题。随着近年来对于相关问题的深入研究，并行多机调度问题正成为生产调度领域研究的热点问题。

本文从港口拖轮作业的实际生产出发，把拖轮调度优化问题作为一种带有特殊工艺约束的并行多机调度问题。这类问题的特殊工艺约束在于拖轮与船舶之间是多对一的动态匹配关系，即不同船长的船舶在靠离泊作业中需要一艘及一艘以上的不同或同种类型拖轮协同工作，对于此类问题可以作为带有特殊工艺约束的并行多机调度问题来解决，为解决上述问题本文设计了基于进化策略的混合算法：首先设计了为实现拖轮最小作业时间和最小作业成本的双目标函数，然后对算法中的编码和解码、重组算子和变异算子进行了设计，最后为提高搜索效率采用相邻不同基因进行多次交换的局部搜索方法，以实现双目标并行最小化的港口调度问题最优化^[31]。

3.1 拖轮作业调度系统的基本结构

本文主要研究大连港大窑湾区域内的拖轮作业调度，所以在研究拖轮调度结构中只研究相关区域的作业流程。

首先，船舶进港靠泊前要等待港方调度发布进港指令，在获准可以进港靠泊后，联系引航站（中国籍船舶可以不申请引航员），引航站指派引航员登船后申请大连海事局 VTS（船舶交通服务），同意后入港靠泊，船舶从起锚状态或待航状态驶入航道进港，在入港过程中引航员根据需要申请拖轮协助作业。一般情况下，拖轮从基地出发，在大窑湾口门处等待入港船并开始护航作业，在护航作业中带好缆绳后协助引航员进行靠泊操作，靠泊结束后拖轮回基地或进行下次作业。

船舶出港前，要申请港方调度离泊，同意后申请大连海事局 VTS（船舶交通服务），如果申请引航员，等引航员登船后由引航员申请大连海事局 VTS（船舶交通服务），大连海事局 VTS（船舶交通服务）同意离泊后，申请拖轮协助进行离泊作业，离泊作业由拖轮将船舶从泊位拖出至航道后，离泊作业完成并护送至大窑湾口门后，返回基地或进行下次作业。另外，当船舶需要移泊时也需要拖轮协助。船舶移泊前，要申请港方调度移泊作业，港方调度同意后同意后申请大连海事局 VTS（船舶交通服务），如果申请引航员，等引航员登船后由引航员申请 VTS（大连海事局船舶交通服务），同意移泊后，申请拖轮协助进行移泊作业，移泊作业由拖轮将船舶从泊位拖出至航道后，再靠泊其他泊位，靠泊结束后拖轮回基地或进行下次作业。

在实际作业中为了满足港口的正常运转，港口企业会根据工作的需要配置相应数量和马力的拖轮。港口同时要配备多艘相同或不同马力的拖轮，用以保证不同类型的船舶靠离泊需要，大连港大窑湾基地拖轮配置如表 3.1 所示：

表 3.1 大连港大窑湾基地拖轮配置
Tab.3.1 The tugboat configuration in Dalian Dayaowan base

拖轮名称	拖轮功率(马力 T)
连港 31	3800
连港 32	3800
连港 36	4200
连港 45	4200
连港 39	6400
连港 40	6400
连港 49	7200
连港 50	7200
连港 51	7200
连港 52	7200

根据大连港作业规定，大窑湾区域集装箱泊位作业要求是按照集装箱船舶的船长（不考虑净载重吨）配备相应种类和数量拖轮协助作业，具体配置原则表 3.2 所示：

表 3.2 根据船长的拖轮配置原则

Tab.3.2 The tugboat configuration based on tugboat length

港区及码头	船舶总长 (m)	拖轮数量	功率配置 (马力 T)	备注
大窑湾 集装箱 船舶	$LOA \leq 100$	≥ 1	单艘马力 ≤ 4200	拖轮配置选择仅
	$100 < LOA \leq 200$	≥ 2	单艘马力 ≥ 3200	考虑 LOA (船长), 不考虑 DWT (净载
	$200 < LOA \leq 250$	≥ 2	单艘马力 ≥ 3800	重吨)。如果没有
	$250 < LOA \leq 350$	≥ 2	单艘马力 ≥ 4200	侧推, 风大时可考
	$LOA > 350$	≥ 2	单艘马力 ≥ 5500	考虑增加一条拖轮 配置

3.2 拖轮作业调度系统进化策略算法的设计

3.2.1 考虑拖轮调度双目标优化建模

港口拖轮作业是港口服务的一个重要组成部分，在港口作业中，船舶的进出港、靠离泊作业需要拖轮协助作业。拖轮作业的合理调度能提高港口作业的生产效率、节约生产成本，同时还能减短船舶的船舶的在港停泊时间，为港口和船公司提高效益。由于需要协助作业的船舶种类、长度、吨位的不同，所以协助每艘船舶作业的拖轮数量和总马力也不同。下面本文以大连港大窑湾作业为例，进行拖轮调度的双目标优化建模。在大连港大窑湾作业区域的拖轮配置如表 3.1 所示。

根据表 3.2 中的拖轮配置原则，拖轮作业调度问题是一种带有特殊的工艺约束的并行多机调度问题, 这种特殊的调度问题与一般的调度问题有所不同，一般的生产调度问题中^[17-38]工件和机器之间关系是一对一匹配的，主要研究某种工件只需由一种机器进行加工作业；而在拖轮作业过程中，船舶和拖轮之间是一对多的动态匹配关系。例如：船长小于 100m 的船舶作业时需要 1 艘拖轮协助服务，船长大于 100m 以上的船舶作业时则需要 2 艘或 2 艘以上的拖轮协助，协助作业的拖轮可以是马力相同的类型或者是不同的类型，但需要满足作业时拖轮功率配置的要求。现假设某艘船舶船长 300m，协助其作业的拖轮功率必须大于等于 4200p，数量大于等于 2 艘（在风力超过 6 级时增加一艘拖轮），在进行调度指派时，可以指派

功率等于 4200p 的 2 艘拖轮,可以指派功率等于 4200p 的 1 艘拖轮和功率大于 4200p 的 1 艘拖轮,也可以指派功率大于 4200p 的两艘拖轮为其服务。这些不同的指派方式使得拖轮作业调度的问题具体化和复杂化。本文研究这类问题的时,考虑到拖轮作业具有效率和成本两方面的因素,所以以“拖轮完成作业时间最短”和“拖轮完成作业生产成本最小”这两个目标为建模方面。

现假设需要拖轮协助的船舶种类有 w 种, $w=1, 2, 3\cdots$, 每种船舶的数量为 M , 船舶的总数为 $\sum M$;拖轮的种类有 v 种, $v=1, 2, 3, \cdots$, 每种拖轮的数量为 N , 拖轮的总数为 $\sum N$ 。现假设拖轮协助船舶作业只有一道工序,即拖轮协助靠泊、协助离泊或协助移泊,每次只能进行一种,不能不同时进行,并且带有一定的工艺约束,即不同种类的拖轮的功率存在差异。所以每种船舶因其种类不同,为其协助的拖轮的功率和数量的要求也不同。例如,假设船舶种类为 4,拖轮种类为 3,船舶和拖轮之间的工艺约束如表 3.3 所示。

表 3.3 特殊的工艺约束
Tab.3.3 The special process constraint

船舶类型	拖轮集合	需同时协助船舶的拖轮数量
1	1, 2	1
2	2, 3	1
3	1, 2, 3	2

在表 3.3 中,不同船舶类型拖轮选择存在差异,如对于船舶 1,只需在拖轮 1 和 2 中选择一台拖轮进行协助作业,而对于工件 3,则需在机器 1, 2, 3 中同时选择 2 台拖轮进行协助作业。为使问题简化,现假设拖轮协助船舶靠离泊时间因船舶种类的不同而不同。设每艘船舶被协助的时间为 T_i ($i=1, 2, 3, \cdots, \sum M$), 每艘拖轮在协助船舶前的等待时间为 P_i , 则每艘船舶被协助作业完成的时间(即拖轮的最大作业时间)为 $\max\{P_i - T_i\}$ 。协助船舶的拖轮作业的成本因拖轮的功率不同而不同,每艘拖轮的生产成本为 x_c ,对于拖轮而言,其拖轮协助船舶靠离泊作业的

主要成本为拖轮油耗成本（由于拖轮成本包含多方面，在这里只讨论油耗成本），设每艘拖轮的收费成本为 R_i ($i=1, 2, 3, \dots, \sum M$)，每艘船舶其协助的拖轮集合为 Y_w ，每艘船舶需要协助的拖轮数量为 Z_w ，则所有船舶被协助完成后的拖轮总成本为

$$\sum_{i=1}^{\sum M} R_i = \sum_{i=1}^{\sum M} \sum_{j=1}^{Z_w} X_{c_i}, c_i \in Y_w$$

船舶由外锚地进港的时间忽略不计，优化拖轮作业调度的目标为拖轮完成作业时间最短和完成作业生产成本最小。本文将采用加权求和的方法优化拖轮作业调度的结果评价，用 f 表示调度的综合评价结果，用 $f_1(T_i)$ 表示拖轮完成作业最大时间，用 $f_2(R_i)$ 表示完成作业生产成本， α 和 β 表示完成作业时间和完成作业生产成本的权重值，则有

$$\begin{aligned} f_1(T_i) &= \max\{P_i - T_i\} \\ f_2(R_i) &= \sum_{i=1}^{\sum M} R_i = \sum_{i=1}^{\sum M} \sum_{j=1}^{Z_w} X_{c_i}, c_i \in Y_w \\ \min f &= \min\{\alpha \times f_1(T_i) + \beta \times f_2(R_i)\} \end{aligned} \quad (1)$$

本文以优化完工时间和生产成本的加权和调度结果进行评价，但由于时间和成本属于不同量纲的参数，因此，先采用式(2)进行无量纲标准化处理，然后采用式(1)进行加权处理，将双目标问题转化为单目标问题。

$$F_i = \frac{f_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i} \times 99 + 1 \quad (2)$$

$i = 1, 2$

式中， f_i 为需要进行无量纲处理的参数，即对应于式(1)中调度的最大完工时间 f_1 和生产成本 f_2 ， f_i 无量纲处理后的最大完工时间 F_1 和生产成本 F_2 。

3.2.2 基于进化策略的混合算法设计

在以往的研究并行多机调度问题的文献中^[10-15]，多采用遗传算法和启发式方

法。本文针对上述带有特殊工艺约束的并行多机调度问题，将采用 $(\mu + \lambda)$ 进化策略算法来求解拖轮作业调度优化问题。在 $(\mu + \lambda)$ 进化策略算法中，由 μ 个父体通过重组和变异产生 λ 个后代，然后从 μ 个父代和 λ 个后代所组成的 $(\mu + \lambda)$ 个个体中，选择 μ 个适合值最好的个体作为下一代的父体。由于进化策略算法对局部搜索能力比较差，所以重新对算法中的局部搜索方法进行了新的优化设计。

1. 个体编码设定

本文采用十进制的编码方式，对船舶和拖轮进行编码。利用船舶的排序作为个体的编码，采用十进制编码表示不同长度的船舶，同种长度的船舶用相同的十进制数表示，相同的十进制数出现的次数为该种长度船舶的数量，个体编码的长度为全部船舶的数量。例如，假设需要拖轮协助的船舶种类为 $w=3$ ，各种船长的船舶数量 $M = \{2, 3, 4\}$ ，则第 1 种船舶用十进制数 1 表示，第 2 种船舶用 2 表示，第 3 种船舶用 3 表示，最后得到的个体编码具体如表 3.4 所示：

表 3.4 个体编码

Tab.3.4 Individual coding

1	1	2	2	2	3	3	3	3
---	---	---	---	---	---	---	---	---

采用这种编码方法的优势在于能把拖轮作业调度问题简单化，同时还能保证每个个体均为一个有效的调度单位。

2. 初始种群产生的设定

随机产生 μ 个需要拖轮协助的不同船长船舶排序，即 μ 个个体算子，个体算子的产生如下：

第一步：设定需要拖轮协助的不同船长船舶的种类为 w ，总数为 $\sum M$ ，同种船长船舶的数量为 M 。

第二步：计算全部船舶中同种船长船舶的比例，表示为 $M / \sum M$ 。

第三步：根据随机数的大小和各种船长船舶的比例大小决定当前产生的船舶的种类，产生一个 $(0, 1)$ 之间的随机数。

第四步：检查各种船长船舶的数量是否满足要求，如满足要求结束；否则转到

第三步，在重新进行计算。

例如，假设船舶船长的种类为 3，各种船长船舶的数量分别为 {2, 3, 4}，各种船长船舶所占总船舶的比例分别为 22%、33%和 45%。当产生的 (0, 1) 之间的随机数在 (0, 0.22) 的区间内时，产生代码为 1 的特定船长船舶，即个体基因 1；当随机数在 (0.22, 0.45) 的区间内时，产生代码为 2 的特定船长船舶；当随机数在 (0.45, 1) 的区间内时，代码为 3 的特定船长船舶。

该方法使初始种群中的每一个个体都成为一个有效的调度单位。

3. 基于交叉互换的重组算子

在进行重组操作时，运用交叉互换的方法进行扩展，首先以双亲双子法产生后代个体，随机从 μ 个个体中选择 2 个个体作为父代进行重组操作，然后再 2 个父代个体中随机选择 2 个基因片段作为交叉互换点，从而将父代个体分割成 4 段体，最后采用隔断互换的方式进行互换，从得到 2 个不同于父代的全新的子代个体。具体如图 3.1 所示：

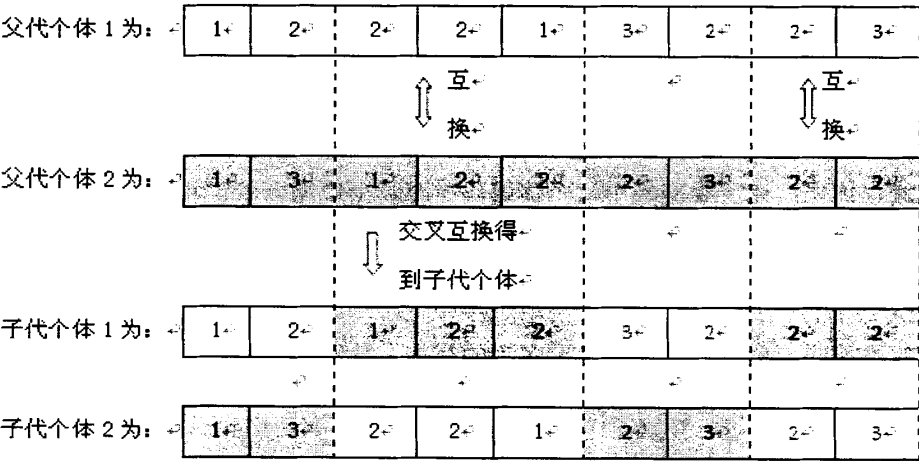


图 3.1 基于交叉互换的重组算子

Fig.3.1 Recombination operator based on cross swap

4. 基于个体内部基因互换的变异算子

在进行变异操作时，运用个体内部基因互换的方法进行扩展，首先在子代个体中，随机选择船长相同的船舶基因值，如果运行过程中，发现其拖轮的配置不

同，将它们的拖轮分配方案进行互换，具体如图 3.2 所示。在变异前个体中基因位置 1 与基因位置 2 进行互换，得到变异后全新的个体。对于每一个新的子代个体而言，变异算子中设定的随机选择基因值，是互换是多次而产生的。

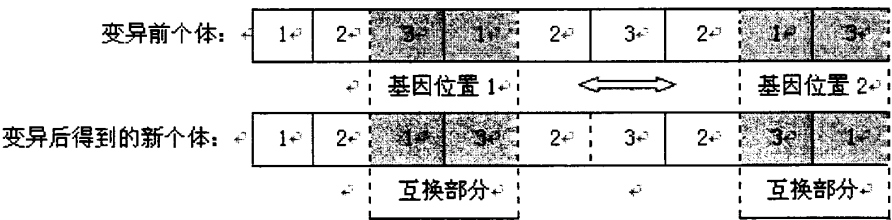


图 3.2 基于个体内部基因互换的变异算子

Fig.3.2 Mutation operator based on individual internal genes swap

5. 基于相邻不同基因交换的局部搜索

进化策略算法的局部搜索能力较差，容易陷入局部最优，引起这个问题的主要原因是新一代群体的产生主要是依靠上一代群体之间的随机交叉重组来完成的，所以即使已经搜索到最优解附近，而想要达到这个最优解，却要进行优化计算。为了提高整个算法的搜索效率和优化结果，可以通过采用旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)中的 k-交换法进行局部搜索，对通过进化策略得到的种群个体进行优化。在实际交换中，个体编码中容易出现相邻基因相同的情况，为了避免多余的计算，可以采用相邻的不同基因进行交换的方法，即在个体编码中随意挑选相邻的两个基因片段，如果两个基因片段相同，将不进行交换，如果两个基因片段不同，将进行交换，通过多次的交换，从而得到局部的最优改良个体。通过此方法可以提高算法的整体搜索效率^[39]。

通过算法中个体编码的设定、基于交叉互换的算子重组、基于个体内部基因互换的算子变异以及基于相邻不同基因交换的局部搜索方法，既保证了所生成拖轮作业调度数据的可行性，又保证了拖轮作业调度的多样性，从而达到拖轮调度方案的最优化。

第 4 章 基于进化策略算法的模型计算

4.1 进化策略算法的实证分析

在大连港大窑湾区域内，拖轮的类型按照马力的大小分为 5 类，如表 3.1 所示。根据大窑湾集装箱船舶和拖轮作业配置要求，将到港靠离泊船舶按照船长分为 5 类。在船舶靠离港作业过程中，不同船型的拖轮作业时间有一定差异。根据船型的大小，随机产生 20 艘船舶的相关作业数据。数据如表 4.1 所示：

表 4.1 20 艘船舶的作业数据库
Tab.4.1 Twenty ships operate database

船舶次序	船型	协助作业时间（分钟）	作业性质	协助拖轮	作业成本
1	1	35	离泊	2	20
2	3	65	移动	2、3	50
3	2	50	靠泊	1、2	30
4	4	70	离泊	3、4	70
5	1	45	靠泊	1	10
6	5	80	离泊	4、4、4	120
7	2	40	移泊	2、3	50
8	3	55	离泊	2、4	60
9	4	80	移泊	3、4	70
10	2	45	离泊	3、4	70
11	1	38	离泊	2	20
12	2	49	移泊	1、2	30
13	2	51	靠泊	2、3	50
14	3	50	移泊	2、4	60
15	5	90	靠泊	4、4、4	120
16	2	45	离泊	3、4	70
17	4	75	靠泊	3、4	70
18	1	42	靠泊	1	10
19	3	70	移泊	3、4	70
20	2	56	靠泊	1、2	30

根据资料统计，拖轮协助 5 种类型船舶的靠离泊平均服务时间分别为 40 min, 48 min, 60 min, 75 min 和 85 min。结合实际生产，根据大窑湾区域拖轮配置情况，本文对调度模型参数进行如下的设定：船舶和拖轮的种类均为 5 种，用数字 1、2、3、4、5 表示，船舶数量为 20 艘，5 种拖轮的数量均为 2。船舶的数量分布、

拖轮配置要求情况和拖轮协助工作时间如表 4.2 所示：

表 4.2 拖轮作业配置及工作时间

Tab.4.2 Tugboat configuration and operate time

船舶类型	船舶数量 (艘)	拖轮集合	需同时作业的拖轮数量 (艘)	协助作业时间 (分钟)
1	4	1、2、3、4、5	1	40
2	7	2、3、4、5	1	48
3	4	2、3、4、5	2	60
4	3	3、4、5	2	75
5	2	3、4、5	3	85

拖轮的作业成本与拖轮的马力和作业时间成正比，也就是拖轮马力越大、作业时间越长拖轮的油耗就越大，同时成本也相应的增加。拖轮的生产作业成本(简化处理) 如表 4.3 所示：

表 4.3 拖轮的作业成本

Tab.4.3 Tugboat operate cost

拖轮种类	1	2	3	4	5
作业成本	10	20	30	40	50

在这里进行计算机的代入运算，首先设置进化策略算法的最大迭代次数为 100，父代种群数量 μ 为 20，子代种群数量 λ 为 30，重组操作中基因串长度为 6，分别设置完成作业时间加权系数 $\alpha=\{0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$ 、作业生产成本加权系数 $\beta=\{1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.0\}$ ，用公式（2）所建立的以拖轮完成作业时间和完成作业生产成本双目标最小的调度优化模型，不同加权系数设置下连续优化计算 20 次，计算结果如表 4.4 所示：

表 4.4 20 艘船舶基于进化策略与局部搜索混合算法的优化计算结果

Tab.4.4 Twenty ships optimized results based on the hybrid algorithm of evolutionary strategy algorithm and local search algorithm

优化次数	α	β	作业完成时间（分钟）	生产作业成本
1	0.0	1.0	283	870
2	0.1	0.9	281	880
3	0.2	0.8	279	890
4	0.3	0.7	265	900
5	0.5	0.5	240	920
6	0.6	0.4	239	930
7	0.7	0.3	237	940
8	0.8	0.2	234	950
9	0.9	0.1	231	960
10	1.0	0.0	230	960
最差值			283	960
最优值			230	870
平均值			252	920

对照表 4.4 的数据，按照船舶的进出港的先后顺序分配相匹配的拖轮类型的原则，运用 “Rockwell Automation Aren” 仿真软件进行计算，可以得到拖轮的最大作业完成时间为 298 分钟，拖轮的最大生产作业成本为 990。因此，从表 4.4 的计算结果来看，基于进化策略与局部搜索混合算法的优化计算结果均好于仿真软件计算的结果，其中 10 次优化计算中的作业完成时间最优值比仿真计算结果少 68 分钟，生产作业成本的最优值比仿真计算结果少了 120；10 次优化的作业完成时间平均值比仿真计算结果少 46 分钟，生产作业成本的平均值比仿真计算结果少了 60。

4.2 结果分析

从上述的结果得出，通过进化策略算法优化计算出的拖轮作业作业完成时间

和生产作业成本的最优值、最差值和平均值均要好于仿真计算的结果。上述结论可以说明过进化策略算法可以对拖轮作业调度进行合理的优化，能够形成行之有效的调度方案，从而提高拖轮的使用效率，降低拖轮的作业成本。

从表 4.4 的计算结果中得出，随着作业完成时间的权重值的增加以及生产作业成本权重值的减少，完成作业的时间逐渐变小，完成作业的生产成本逐渐变大。在实际的生产作业过程中的生产效率和生产成本是两个相互矛盾的因素，这说明在拖轮作业调度过程中，对两种权重值进行适当的调整，就可以得到相对应的最优解，即最优调度方案。可以根据计算的结果，合理的进行调配，使完成作业时间和完成作业生产成本双目标同时相对最小。合理的运用以上方法可以更加合理的利用拖轮资源，间接的提高靠离泊船舶进出港效率和港口经济效益。

拖轮调度是港口生产系统的一个重要组成部分，其优化问题直接影响港口是否能高效的运转，甚至关系到船舶是否能够按计划进出港。本文结合带有特殊工艺约束的多处理任务调度理论，以完成作业时间和完成作业成本双目标最小化为目标，对拖轮作业调度问题进行了建模分析，并在拖轮调度模型中充分考虑了两个最小化的目标。在此基础上设计了进化策略与局部搜索相结合的混合算法，并对进化策略算法的编码和解码、重组算子和变异算子进行了设计。混合算法在设计上满足了拖轮实际作业中的工艺约束条件，保证了算法中种群的多样性，通过运用混合计算得出的优化结果与仿真计算的结果进行了比较，证明了混合算法的有效性和实用性。计算结果同时也表明，基于进化策略算法的混合算法可以得到较好的优化结果，适用于实际的生产中，对拖轮作业调度具有指导作用。

第 5 章 结论与展望

拖轮作业调度问题是一种带有自身特殊性的问题，尤其在建模方面，其具有多样性和计算复杂的问题。因为调度问题的随机性和约束性强，所以在建模时要考虑到与实际工作中相关的问题，这样就给建模带来一定的难度。

本文首先介绍了一般生产调度问题的研究方法和策略，然后根据实际生产中的拖轮调度问题的实际情况和面临的问题，提出了建立两个最小化目标，在此基础上设计了进化策略和局部搜索相结合的混合算法，并将此算法应用的实际的拖轮调度作业中。对实际拖轮调度作业具有实际的指导和促进作用，其中对调度工作的改进体现在以下方面。

根据大连港大窑湾作业区域实际情况，结合大连港轮驳公司拖轮调度数据，以拖轮作业时间和作业成本最小化为目标函数，建立了拖轮调度的模型。选择基于大连港拖轮协助船舶作业的相关配置要求进行编码，然后通过进化策略算法的基因交换和基因变异等方法再结合局部搜索算法，实现混合算法。通过总结了目前调度作业中的实际方法的基础上，运用混合计算的计算结果与仿真计算结果相比较。证明了混合算法的有效性和实用性。计算结果表明，基于进化策略算法的混合算法可以得到较好的优化结果。

本文基于前人的研究基础上，对拖轮调度问题的研究进行了扩展。但由于个人的能力有限和调度问题的复杂性，在实际工作中还会受到突发事件，气象变化等问题，这些都会对深入的研究产生了一定的影响，所以在对拖轮作业调度问题的研究还有以下几方面的不足。

1) 需要进一步的加强基于进化策略算法的混合算法的研究，改进算法的局限性，加快搜索速度。

2) 更好的结合实际生产，把实际作业中的突发事件、气象变化等问题结合到算法中，例如大风浪天气中需要增加拖轮配置、作业过程中被协助船舶失去动力需要增加拖轮配置等问题。

3) 结合港口调度和引航站的作业计划，全方位的合理设计与之相对应的拖轮调度计划系统，制定相应的拖轮作业方案，开发能够自动优化的全智能系统。

参考文献

- [1] 庄倩玮,王健. 国外港口物流的发展与启示. 物流技术. 2005.
- [2] 蔡丽丽. 大连港集装箱物流系统改进研究:(硕士论文). 大连:大连海事大学, 2012.
- [3] 大连港股份有限公司. 大连港股份有限公司网站. 2014.
- [4] 孟祥林. 新经济背景下港口物流发展对策研究. 港口经济. 2012.
- [5] 梁佩珩. 港口物流发展优势及对策的探讨. 珠江水运. 2006.
- [6] 黄发义. 我国港口物流发展现状及趋势分析. 珠江水运. 2008.
- [7] 边国志. 国内外港口物流的发展与启示. 中国新技术新产品. 2009.
- [8] 吴勇军. 基于 FSA 的船舶引航系统的安全评估:(硕士论文). 厦门: 集美大学, 2013.
- [9] 王灿明, 严新平. 我国港口物流业的发展战略研究. 湖北商业高等专科学校学报. 2002.
- [10] 宋存利, 时维国, 黄 明. 遗传算法在并行多机调度问题中的应用. 大连铁道学院学报. 2004.
- [11] 董良才, 徐子奇, 宓为建. 基于遗传算子粒子群算法的拖轮动态调度. 数学的实践与认识. 2012.
- [12] 杨志华. 港口拖轮总体配置的仿真研究及应用[D]. 武汉理工大学学报. 2003.
- [13] 刘志雄, 王少梅. 港口拖轮作业的计算机仿真研究[J]. 系统仿真学报. 2004, 16(1):45-47.
- [14] 刘贵亮. 船舶操纵中拖轮的运用[J]. 航海技术. 2008, 2:31-32.
- [15] 何涛, 朱宏辉. 遗传算法在拖轮调度中的应用[J]. 武汉: 物流技术, 2008, 27(4): 138-149.
- [16] Liu Z X. Hybrid evolutionary strategy optimization for port tugboat operation scheduling[C]// 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2009: 511 515.
- [17] 刘志雄. 考虑最短距离作业的港门拖轮作业调度优化. 西南交通大学学报. 2011, 46(5): 875 881.
- [18] Kashan A H, Karimi B. A discrete particle swarm optimization algorithm for scheduling parallel machines[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008:1-8.
- [19] Pan Q K, Tasgetiren M F, Liang Y C. A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flow shop scheduling problem[J]. Computers and Operations Resrarch, 2008, 35(9):2807-2839.
- [20] 于越. 基于仿真优化的集装箱港口堆场大门系统研究:(硕士论文). 大连:大连理工大学, 2006.

- [21] 张艳丰. 锦州港拖轮船队发展规划研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2013.
- [22] 褚德欣. 进化计算及其在智能控制中的应用. 科技情报开发与经济. 2004.
- [23] 周立丽. 基于 EP 算法的离散型 AMSAA 可靠性增长模型参数的求解研究. 哈尔滨理工大学硕士学位论文. 2013.
- [24] 鲍琨. 复合粒子群算法及其应用研究. 中南大学硕士学位论文. 2013.
- [25] 覃锦华. 求解旅行商问题的进化算法: (硕士学位论文). 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [26] 金晓慧. 基于流形距离和核函数的进化聚类算法研究及其应用: (硕士学位论文). 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [27] 宋晓峰, 亢金龙, 王宏. 进化算法的发展与应用. 现代电子技术. 2006.
- [28] 李世祥, 王樱. 演化计算综述. 软件导刊. 2005.
- [29] 陈妍. 进化策略算法与应用的研究: (硕士学位论文). 长春: 吉林大学, 2008.
- [30] 刘淳安. 几类动态与静态优化问题的进化算法: (博士学位论文). 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [31] 刘志雄, 王少梅. 带特殊工艺约束的双目标并行多机调度问题研究. 计算机集成制造系统. 2005.
- [32] 邓锐, 全惠云. 基于格雷码和进化策略的遗传算法研究. 科学技术与工程. 2007.
- [33] 刘 民, 吴 澄, 杨英杰. 并行机优化调度问题的新算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(5): 115-117.
- [34] 刘 民, 吴 澄, 杨英杰. 并行多机调度问题的一种基于组合规则的遗传算法[J]. 电子学报, 2000, 28(5): 52-54.
- [35] 时维国, 宋存利, 黄 明. 基于启发式算法的并行多机调度问题研究[J]. 大连铁道学院学报, 2003, 24(4): 55-57.
- [36] 常俊林, 张春慨, 邵惠鹤. 求解一类并行多机调度问题的混合启发式算法[J]. 计算机仿真, 2004, 21(3): 121-124.
- [37] 刘 民, 吴 澄, 尹文君. 带特殊工艺约束并行机器生产线调度问题的一种遗传算法[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 381- 386.
- [38] 李怀祖. 决策理论导引[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 53-54.
- [39] 王巍, 赵宏, 李强. 面向多停泊基地的港口拖轮调度优化研究. 计算机工程与应用. 2013.
- [40] 熊军魁. 港口拖轮优化配置研究: (硕士学位论文). 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [41] 熊军魁. 港口生产与拖轮配置问题探讨. 船海工程. 2003, (1): 45-46.
- [42] 潘文军, 王少梅. 基于神经网络的聚类分析方法及在港口设备配置中的应用. 交通与计算机. 2003, 21(5): 44-47.

- [43] 陈伟. 仿真优化方法及其在港口设备配置中的应用研究:(硕士学位论文). 武汉:武汉理工大学, 2002.
- [44] 陈伟, 沈斌, 王少梅. 启发式仿真优化方法在设备配置中的应用研究. 系统仿真报. 2005, 17(9): 2280-2283.
- [45] Zhixiong Liu, Shaomei Wang. Operation Resource Allocation Optimization of Discrete Event SystemBased on Simulation. Journal of Wuhan University of Technology. 2005, 29(2): 327-330.
- [46] 靳志宏, 计明军. 物流实用优化技术. 北京:中国物资出版社, 2008.
- [47] Metropolis N., et al. Equation of state calculations by fast Computing mathines. Journal of ChemicalPhysics. 1953, 21: 1087-1092.
- [48] 田澎, 王浣尘, 张冬莱. 旅行商问题 (TSP) 的模拟退火求解. 上海交通大学学报. 1995, 30(S1). 111-116.
- [49] 庞哈利, 郑秉霖, 徐心和. 一种自适应的模拟退火算法. 控制与决策. 1999, 14(5): 477-480.
- [50] 靳利霞. 蛋白质结构预测方法:(博士学位论文). 大连:大连理工大学, 2002.
- [51] 计明军. 若干随机性全局优化算法的研究:(博士学位论文). 大连:大连理工大学, 2004.
- [52] 李红芳, 侯朝胜. 模拟退火遗传算法与结构优化设计. 天津理 I:学院学报. 2004, (4): 96-98.
- [53] 康立山, 谢云, 尤矢勇等. 非数值并行算法——模拟退火算法. 北京:科学出版社, 1994.
- [54] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [55] 张晓萍, 石伟, 刘玉坤. 物流系统仿真. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [56] 卫军胡, 韩九强, 孙国基. 离散事件系统仿真技术在制造系统调度中的应用. 系统仿真学报. 2000, 12(1): 27-30.
- [57] Lacksonen T.. Empirical comparison of search algorithms for discrete event simulation. Computers &Industrial Engineering. 2001, (40): 133-148.
- [58] Law A. M., Kelton W. D.. Simulation Modeling and Analysis (3rd edition). Beijing: TsinghuaUniversity Press, 2000.
- [59] 程光, 郭洪迈, 陈永刚. 工业工程与系统仿真.. 北京:冶金工业出版社, 2007.
- [60] 刘玉坤, 石伟, 张晓萍等. 描述离散动态系统的集合标识 Petri 网:STPNs. 系统工程理论与实践. 2004, (7): 59-65.
- [61] 刘玉坤. 装配型供应链库存系统建模与分析:(博士学位论文). 北京:清华大学, 2004.
- [62] 朱顺应, 朱凯, 王丽铮. 基于 Arena 的三峡枢纽运输系统仿真模型. 水运工

程. 2011, 450(2):40-44.

[63] 杨磊. Y 医药物流中心作业系统 Arena 仿真优化应用研究: (硕士学位论文). 西安: 长安大学, 2009.

[64] 李立, 王晓东, 邱梦, 等. 基于 Arena 的集装箱码头内部道路运输系统仿真研究. 河北工业大学学报. 2010, 39(2): 64-68.

[65] 袁子文, 张培林, 董升平. 基于 Arena 的武钢工业港原料码头物流系统仿真研究. 交通科技. 2009, (4): 151-153.

[66] 方绍强, 卫克, 陈伟鹏, 等. 飞行保障过程 UML 建模与 ARENA 仿真. 系统工程理论与实践. 2008, (11): 165-170.

[67] 屈乾沁, 关晓兰, 刘志萍. 基于 Arena 的电子商务物流配送体系的建模与仿真研究. 物流技术. 2010, 29(1): 90-92.

[68] 郑耿灶, 苏平, 豆之敬. 基于仿真优化方法的混合装配线平衡. 工业工程. 2010, 13(3): 121-125.

[69] 马文强, 杜子平, 李东坡. 仿真优化在制造系统生产调度中的研究进展. 现代制造工程. 2012, (3): 10-14.

[70] Kelton W. David, Sadowski Randall P., T. Sturrock David. Simulation with Arena (ThirdEdition). US: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.

致 谢

在本论文即将完成之际,我谨向在攻读硕士研究生期间,曾经关心、帮助、支持和鼓励过我的老师、亲人、同学和朋友表示衷心的感谢和诚挚的祝福!回首在大连海事大学多年的求学路,心中充满无限感激。首先感谢我的导师李伟教授的悉心指导和热忱帮助。从论文的选题、撰写到最终定稿,无不倾注着老师的心血和汗水。老师以严谨治学、宽厚待人、积极乐观的态度,为我树立了学习榜样,指引着我克服学习。在此,谨向李伟老师致以深深的敬意和衷心的感谢!

感谢航海学院所有老师年来的辛勤教育和培养,感谢 2012 年航海学院研究生班这个大家庭多年来给予的温暖。在这里有真挚的同窗之情,让我在漫长的求学路上从不感到孤单。论文的顺利完成,离不开家人的鼓励和支持。在这里,我还要深深的感谢我的父母和家人们,他们在我求学的过程中始终给我无私的帮助和无尽的关怀,他们的爱是我奋斗的动力和力量的源泉。最后,向所有关心、理解、支持和帮助过我的师长、同学、亲人和朋友们表示衷心的感谢!

2014 年 9 月