

摘要

海运是全球贸易和经济发展至关重要的组成部分，它是物流运输行业中最重要的一种运输方式。在贸易、能源、旅游等方面，海运都发挥着至关重要的作用。而海运中集装箱码头又扮演着不可或缺的角色，集装箱码头是专门用于装卸集装箱货物的码头，其作用和重要性不言而喻。近年来，随着国际航运市场份额的不断增加，对港口的需求也随之增加，因此，如何合理的安排港口的运作就变得非常重要。

为了解决集装箱码头的运作优化问题，就必须考虑泊位和岸桥的分配，因为港口泊位及岸桥等资源的增加总是有限的，合理安排泊位及岸桥，可使港口作业更高效，降低经济成本和时间成本。所以，在集装箱港口运作中，泊位与岸桥的排程问题是最关键的问题。本文基于国内外关于提高码头泊位分配和岸桥分配研究的基础上考虑船只到港时间的不确定性，建立了以最小化船只等待停泊时间和船只最佳位置偏离为目标的双目标鲁棒优化模型，同时考虑到将泊位分配和岸桥分配进行联合调度，并建立以最小化船只等待停泊时间，船只离港延迟时间和船只最佳停泊位置偏离为目标建立不确定条件下多目标泊位岸桥联合调度鲁棒优化模型。不同于随机规划，鲁棒优化不需要知道不确定参数的具体分布，而是以多场景集来表示参数的不确定性。本文以遗传算法为基础引入模拟退火算法的局部搜索思想对传统遗传算法进行改进，提高传统遗传算法的局部发掘能力。

收集港口船只到港时间及偏差时间作为样本数据，通过 K-S 检验方法对船只到港时间分布以及船只到港时间偏差分布进行非参数检验，得出船只到港时间服从指数分布，到港时间偏差服从正态分布，进而通过指数分布和正态分布产生多场景下所需数据进行实验。通过数值实验对模型和算法的有效性进行验证，发现通过多场景集合的目标函数的方差和期望共同构造鲁棒优化模型相对于以多场景集目标函数的期望构造鲁棒优化模型所获得的目标值对于不确定参数的波动更稳定，提高了模型对于不确定参数的反应能力。同时所设计的混合遗传算法相对于传统遗传算法收敛速度更快，自适应遗传算法随着问题规模的提升相对于传统遗传算法所获得的解的质量也有一定程度的提升。

关键词：鲁棒优化；遗传算法；模拟退火算法；集装箱码头；联合调度；非参数检验

Abstract

Shipping is a vital component of global trade and economic development. It is the most important mode of transportation in the logistics industry. Shipping plays a vital role in trade, energy, tourism and so on. The container terminal plays an indispensable role in sea transportation. The container terminal is specially used for loading and unloading container goods, and its role and importance are very great. In recent years, with the increasing proportion of sea transportation, higher requirements are put forward for container terminals. In this context, how to reasonably arrange the operation of container terminals is particularly important.

In order to solve the operational optimization problem of container terminals, it is necessary to consider the allocation of berths and quayside Bridges. Since the resources of berth and quayside Bridges in container terminals are always limited, reasonable scheduling of berth and quayside Bridges can improve the operation efficiency of container terminals and reduce economic and time costs. Therefore, berths and quayside bridge scheduling is the core of container terminal operation. Based on domestic and foreign studies on improving berth allocation and quay bridge allocation, this paper establishes a biobjective robust optimization model with the objective of minimizing berth waiting time and optimal position deviation, considering the uncertainty of ship arrival time. At the same time, considering berth allocation and quayside bridge allocation for joint scheduling, and establish a multi-objective berth berth joint scheduling robust optimization model under uncertain conditions to minimize ship waiting time, ship departure delay time and ship optimal berth deviation. Different from random programming, robust optimization does not need to know the specific distribution of uncertain parameters, but represents the uncertainty of parameters with multi-scenario sets. Based on genetic algorithm, this paper introduces the local search idea of simulated annealing algorithm to improve the traditional genetic algorithm and improve the local mining ability of traditional genetic algorithm.

Port ship arrival time and deviation time were collected as sample data. The K-S test method was used to conduct non-parametric test on ship arrival time distribution and ship arrival time deviation distribution. It was concluded that ship arrival time obeyed exponential distribution and arrival time deviation obeyed normal distribution, and then the required data under multiple scenarios were generated by exponential distribution and normal distribution for experiments. The effectiveness of the model and the algorithm is verified by numerical

experiments. It is found that the robust optimization model constructed by the variance and expectation of the objective function of the multi-scenario set is more stable to the fluctuation of uncertain parameters than that constructed by the expectation of the objective function of the multi-scenario set, which improves the response ability of the model to uncertain parameters. Meanwhile, compared with the traditional genetic algorithm, the convergence speed of the designed hybrid genetic algorithm is faster, and the quality of the solution obtained by the adaptive genetic algorithm is also improved to a certain extent with the increase of the problem scale.

Key words: robust optimization; genetic algorithm; simulated annealing algorithm; container terminal joint scheduling; Nonparametric test

目录

摘要	I
Abstract.....	II
目录	IV
第一章 绪论	1
§1.1 引言	1
§1.2 研究意义.....	3
§1.2.1 泊位和岸桥联合调度的意义	3
§1.2.2 对泊位和岸桥联合调度进行鲁棒优化的意义	3
§1.3 国内外研究现状	4
§1.3.1 泊位分配研究现状	4
§1.3.2 岸桥分配研究现状	5
§1.3.3 泊位分配与岸桥分配联合调度	5
§1.3.4 港口调度的鲁棒优化	7
第二章 集装箱码头理论基础	8
§2.1 集装箱码头基础设施概述.....	8
§2.2 集装箱码头作业概述	10
§2.3 求解算法理论基础	10
§2.3.1 模拟退火算法基础理论	10
§2.3.2 遗传算法基础理论	12
§ 2.4 数理统计基础及非参数检验	14
§ 2.4.1 数理统计基础	14
§ 2.4.2 非参数检验	15
第三章 不确定参数下港口泊位分配的鲁棒优化模型	16
§3.1 问题描述.....	16
§3.2 模型的建立	17
§3.2.1 参数设定	17
§3.2.2 模型假设	18
§3.2.3 双目标泊位分配鲁棒优化模型的建立	18
§3.3 模型求解算法设计	20
§ 3.4 船只到港时间及偏差时间分布分析.....	24
§ 3.4.1 船只到港时间间隔规律分析	24

§ 3.4.2 船只实际到港时间偏差分析	24
§3.5 数值实验	25
§3.5.1 算例生成	25
§3.5.2 数值实验结果分析	26
§3.6 本章小结	31
第四章 不确定参数下泊位岸桥联合调度的鲁棒优化模型	32
§4.1 问题描述	32
§4.2 模型的建立	33
§4.2.1 参数设定	33
§4.2.2 模型假设	34
§4.2.3 泊位与岸桥联合调度模型的建立	35
§4.3 模型求解过程	36
§4.4 数值实验	41
§4.5 本章小结	43
第五章 总结与展望	44
§5.1 主要研究结论	44
§5.2 研究展望	45
参考文献	46
附录	50
致谢	58

第一章 绪论

§1.1 引言

随着全球经济一体化的形成，全球货物运输网络变的越来越重要。近些年来国与国之间的贸易往来货物量变的越来越大，陆路运输和航空运输已无法满足日益增长的需求。因此海上运输便成了全球贸易的主要运输方式。海上运输能够处理大型和笨重的货物，其运输货物的能力远远超过陆路运输和航空运输，同时海运还有着运价低廉的优势，并且安全性也更好，相比与陆路运输损失率更低。事实上如今全球贸易的货物超过 90%的货物都是通过海运来运输的。这表明在现在以及未来海上运输将有着广阔的前景。而中国一直贯彻着改革开放的方针，海运港口犹如一扇大门，全国各地的商品通过这扇大门源源不断的运送到世界各地，近些年来中国海运年总量持续增长（如图 1-1 所示），带动了中国经济的发展，同时也为全球经济一体化做出了巨大的贡献，至 2022 年中国海运已超过全球海运总量的 30%。

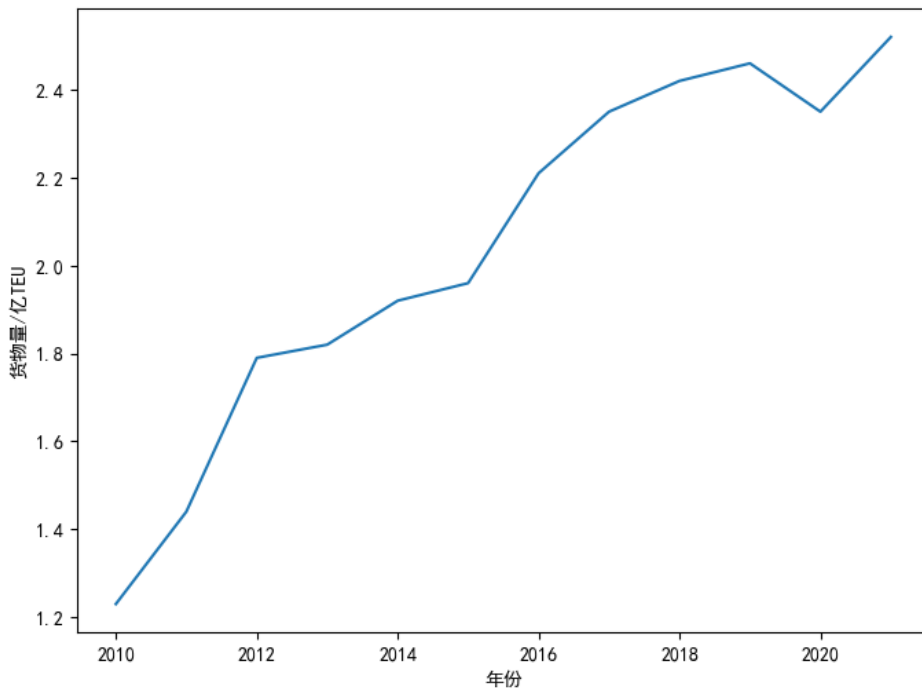


图 1-1 近十年我国港口吞吐量

对海运量如此快速的增长，对各集装箱码头来说是机遇的同时更是挑战，面对日益增长的货物量和有限的港口设施资源，所有的港口都在不停地改造、扩大，主

要为泊位的扩建和港口结构的改善，以及泊位调度岸桥分配等以提高港口服务质量，从而吸引更多的船只停靠。扩建泊位和改善港口结构势必会花费大量的人力，物力和时间，这就需要对多种资源进行联合调度，并相应地制定一套更加优化的调度计划，以达到最大限度地利用港口资源，从而提升码头的总体运营效率。关于资源的调度主要分为港口泊位的调度和港口岸桥的调度，合理的泊位调度和岸桥分配对于提高港口效率至关重要。在实际集装箱码头的每日运营中，码头的工作人员会在一个规定的范围内为预计到港的船只分配停泊时间和停泊位置，在给到港的船只分配完停泊时间和停泊位置后便可以根据停泊时间和停泊为只计算出分配给对应船只的岸桥。通过这种方式为船只分配岸桥并没有考虑到岸桥分配和泊位分配之间的关联性，例如在计算岸桥分配时没有考虑到岸桥的状态，如果分配船 B 的岸桥处于工作状态的话，那么就需要等到岸桥装卸作业结束后才能为船 B 进行装卸作业。这样的话就可能会导致岸桥分配的不合理问题，从而增加船只在码头停留的时间，降低工作效率以及航运公司的满意度，因此对集装箱码头的泊位分配和岸桥分配进行联合调度对于提高集装箱码头的运行效率以及航运公司的满意度都有重大意义。

通常情况下，集装箱码头会按照事先制定好的计划进行作业。但是在现实生活中，在一个规划范围内到港的船只往往会遇到各种突发状况导致实际的到港时间偏离预计的到港时间，这些意外情况包括：坏天气、操作过程中发生的意外、岸桥损坏、前一个港口的耽搁等等这些情况都会使得船只的实际到港时间难以预料，岸桥的作业时间发生变化会使得船只在港口的时间发生变化。如果一艘船提前到达了码头就必须在锚地等待，等待被分配的泊位可用后再去停泊并进行装卸作业；如果一艘船相对于计划的到港时间发生了延迟，那么事先为该船只安排的停泊位置和岸桥就会空闲下来这样就会造成泊位和岸桥资源的浪费，降低集装箱码头的运行效率提高码头的运行成本。所以，在码头的能力与码头的运输需要间，很难取得供求的平衡。这就导致了港口资源的浪费。只有充分发挥港口现有的资源优势，对泊位和岸桥进行最优配置，才能有效地减少在港时间，节省人力物力。提高港口的服务质量，这样才能提高港口竞争力，吸引更多的船只停泊，最大化港口的经济效益。因此，根据现实情况建立一个鲁棒的模型获得鲁棒计划表变得尤为重要。

§1.2 研究意义

§1.2.1 泊位和岸桥联合调度的意义

泊位就是进港船只进行装卸货物的场地，理想的情况是船只按照预计的时间到达港口，到港后即可按预先指定的计划表进行停泊。岸桥是用来装卸货物的一种设备，分布在泊位边，船只靠泊在泊位后便可以由岸桥进行装卸作业。岸桥配置的合理安排能缩短船的卸货时间、降低岸桥的作业成本，从而提高港口效益。泊位与岸桥是港口的最为重要的资源，合理的安排有助于节约成本，提高顾客满意度，吸引到更多的船只停泊。在此基础上，港口管理人员将根据各泊位的闲置状况、实际情况、船舶预计到达的时间等因素，制定出最优的靠泊方案。岸桥调度问题是在已知停泊计划表之后，根据船只的集装箱数量，以及计划表中船只的停泊位置为船只分配岸桥。岸桥的调度计划与船只的停泊计划表相互影响，所以，制订适当的方案，对岸桥及泊位的分布和利用进行合理的协调是非常重要的。但在现实中，船舶到达时间具有一定的不确定性，给该问题的研究带来了一定的困难。当船只聚集在一起的时候，虽然泊位始终处于被利用的状态，但是船舶将出现严重的拥堵现象，将造成经济损失。所以，要想减少船舶等待泊位的时间，减少船舶排队的现象，港口必须要扩大建设规模，加大投资，多建设泊位。然而，随着客流量的下降，泊位就会变得空置，这就导致了港口建设投资的闲置。所以，船舶泊位安排与岸桥布置紧密相关。如果靠港的船舶很多，但岸桥却很少，船只得等待装卸时间就会增加，从而导致船只离港的延迟。在这种情况下，岸桥的合理配置将会减轻船舶的停泊状况。

§1.2.2 对泊位和岸桥联合调度进行鲁棒优化的意义

理想的状态下，各港口的调度工作将按照事先安排好的时间表进行。但是在实际操作中会有很多的不确定性因素，例如天气，码头设备故障，如集装箱数量等，均有可能发生变动，其中任何一项的变动，均会使已订好的进度表不能正常执行。工作人员必须根据这一情况做出相应的调整。这种调整从时间上来说，影响了港口的运营效率，从经济上来说，这是一笔很大的开支。所以，寻找一种能够抵抗不确定性因素影响的调度方法是非常重要的。鲁棒优化是一种在不确定因素影响下，能

有效地解决不确定问题的最优解。与随机规划和敏感性分析不同，它不需要明确参数的分布，但却能找到一个可以抵抗不确定参数干扰的解。因此，在不确定条件下，岸桥和泊位的协同调度问题，需要对确定性模型进行稳健的优化，使其在船舶停靠费用最小的同时，满足客户的满意需求。本项目以泊位和岸桥调度问题为研究对象，针对船舶到达时间不确定的特点，研究一类具有鲁棒性的泊位和岸桥调度模型。将多个情景组合用于描述模型中的参数不确定性。在此基础上，通过对各种不确定性因素的分析，提出了一种鲁棒优化方案。

§1.3 国内外研究现状

目前对于港口高效运转的研究越来越多，其中研究的主题主要分为两部分：泊位分配和岸桥分配。本篇论文将从泊位分配，岸桥分配，泊位分配与岸桥分配联合调度，以及港口调度的鲁棒优化四个方面介绍港口调度问题研究进展。

§1.3.1 泊位分配研究现状

泊位分配指的是为到达港口的船只分配停靠的位置以及进行装卸作业的时间，关于泊位分配, Imai 等^[1]对泊位进行了分类，分别为连续性泊位、离散型泊位以及混合型泊位。离散型泊位指的是在码头上将码头岸线分为几个独立的区域，在某一时刻某个区域只允许停靠一艘船，这种泊位一般出现在折线型码头或是码头岸线水深差距较大。由于水深差距较大，不同型号的船只吃水深度不同，因此会采用离散型泊位。连续型泊位指的是船只可以停靠在码头的任意位置，泊位之间没有界限，这种泊位可以提高码头岸线的利用率。最后一种是混合型泊位，混合型泊位指的是码头岸线被分成了独立的泊位，但是大型船只可以占用多个连续的泊位，同时多个小型船只可以占用同一个泊位。从时间属性上可以将泊位分配问题分为静态泊位分配和动态泊位分配，静态泊位分配指的是在制定决策是所有船只都已到达港口，动态泊位分配指的是在制定决策时部分船只并没有到达港口。

Bierwirth C 等^[2]首先研究了离散型泊位分配问题，该论文以最小化船只等待时间和船只最佳停泊位置为目标建立模型，该论文为泊位分配问题研究的先行者，但由于该论文研究的是静态泊位分配，而现实中船只是动态到达港口的，因此该论文在现实中的应用较少。Imai 等^[3]将静态泊位分配延伸为动态泊位分配，以最小化船只等待时间为目标建立模型，并提出了一种基于拉格朗日的启发式算法求解该问题，

他们的研究假设所有的泊位都具有相同的水深，但是在现实中不同港口不同泊位的水深可能是不同的。Nishimura 等^[4]通过考虑不同水深进一步拓展了动态泊位分配。Monaco 等^[5]用以开发的拉格朗日启发式算法研究了一个类似的问题。P Frojan 等^[6]研究了连续型泊位分配问题，建立了一个综合考虑锚地等待成本和离港延迟为目标的模型。L Chen 等^[7]建立了一个考虑船舶离港延迟泊位偏差距离为目标的动态连续泊位分配模型。Carlos 等^[8]研究了连续泊位的动态分配，提出了一种混合整数模型，以减少叉车和吊车的行驶距离为目标。J F 等^[9]讨论了带有时间窗的动态泊位分配问题。S W Sun 等^[10]从潮汐的水位变化和船舶的到达时间的变化方面研究了潮汐对泊位分配的影响。陈航^[11]研究了带有位置偏好的泊位分配问题，将泊位配置问题转换为二维条形码装载问题。提出了一种基于混合整数的线性规划方法。杨蕊^[12]考虑了环境因素，以最小化碳排放和最小化码头成本为目标建立模型。石甘泉^[13]考虑了带有航道与潮汐因素的约束建立混合整数线性规划模型。那广哲^[14]在集卡调度成本基于靠泊位置的假设前提下以码头的总成本为目标，并设计禁忌搜索算法对该问题进行求解。

§1.3.2 岸桥分配研究现状

关于岸桥的分配，许多学者对此作了较深的探讨。曾庆成等人^[15]提出一种基于最大完成时间最短的岸桥施工排程模型，并利用贪心的随机搜索算法对其进行求解。基于此，韩笑乐等人考虑岸桥运行的具体工况，提出了考虑桥面等限制条件下的船体与船体的混杂卸载模型。乐美龙等^[17]构建了岸桥运输货运量与运输时间的相互平衡的数学模型，并提出了一种基于遗传算法的求解方法。张皓博等^[18]将堆场作业平衡纳入到所建模型中，使最大完成时间与岸桥等候时间达到最小为目标，构建了一个双目标岸桥调度模型，并对其进行了仿真验证。张颖等^[19]在此基础上，提出了一种以减少停泊时间为目的的单亲基因方法，并对其进行了数学建模。梁承姬等^[20]从安全距离、作业次序等方面综合考虑岸桥运输作业，以使岸桥运输及等候时间最短为优化目标，构建了相应的数学模型，并利用改进的遗传算法进行求解。

§1.3.3 泊位分配与岸桥分配联合调度

Park Y-M 等^[21]第一次同时考虑泊位分配和岸桥分配问题，自此以后泊位分配和岸桥分配联合调度变引起了广泛关注。Meisel F 等^[22]以最小化总服务成本为目标构建模型，并提出了一个构造启发式算法，局部细化程序和两个启发式算法进行求解。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/548046023140006115>