学校代码：10126　　　　　　　　　　　　　　　　学号：31336006
分 类 号：　　　　　　　　　　　　　　　　　　　编号：

论文题目

不确定性条件下的集装箱码头泊位分配与岸桥调度问题的研究

学　　院：数学科学学院

专　　业：数学

研究方向：运筹学与控制论

姓　　名：刘慧莲

指导教师：曹瑾鑫教授

2016 年 5 月

Research on the Berth Allocation and Quay Cranes Scheduling Problem in Container Terminals under Data Uncertainties

Liu Huilian

Supervised by Professor Cao Jinxin

School of Mathematical Sciences,

Inner Mongolia University, Hohhot, 010021

May, 2016

原创性声明

本人声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除本文已经注明引用的内容外，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**内蒙古大学**及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谢意。

学位论文作者签名：　　　　指导教师签名：

日　　　期：2016.5.28　　　　日　　　期：2016.5.28

在学期间研究成果使用承诺书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：内蒙古大学有权将学位论文的全部内容或部分保留并向国家有关机构、部门送交学位论文的复印件和磁盘，允许编入有关数据库进行检索，也可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编学位论文。为保护学院和导师的知识产权，作者在学期间取得的研究成果属于内蒙古大学。作者今后使用涉及在学期间主要研究内容或研究成果，须征得内蒙古大学就读期间导师的同意；若用于发表论文，版权单位必须署名为内蒙古大学方可投稿或公开发表。

学位论文作者签名：　　　　指导教师签名：

日　　　期：2016.5.28　　　　日　　　期：2016.5.28

不确定性条件下的集装箱码头泊位分配与岸桥调度问题的研究

摘 要

泊位和岸桥是集装箱码头两种重要的稀缺资源，泊位是减少船舶在港时间的主要“瓶颈”之一；岸桥是整个物流运作的核心，两者相互制约。目前，许多学者往往忽视岸桥分配对船舶的在港时间、服务船舶的等待时间等的影响，只研究两者的单独调度。随着经济的不断发展，将泊位与岸桥整合调度已是大势所趋。泊位与岸桥的协调调度不仅可以满足泊位与岸桥的现实约束，而且可以节约成本，又避免单独调度的局限性。基于目前调度存在的问题，本文在已有研究文献的基础上，建立了确定的泊位—岸桥联合调度模型。在实际操作中，由于船舶的到港时间、工作量、码头的设备故障、天气、操作人员的熟练程度等因素的改变都将影响既定计划，降低工作效率，增加额外的投入成本。因此，在确定模型的基础上考虑不确定因素的影响，确定合理的调度方案来提高资源的利用率，准确地应对不可避免的扰动，减少既定计划的调整次数。鲁棒优化作为研究不确定问题的一种方法，不同于随机规划等优化方法，无需知道其参数的准确分布，便于问题的求解。

文章通过考虑船舶的到达时间的不确定性，建立了岸桥相互干扰或不干扰的泊位与岸桥联合调度的鲁棒优化模型。并用分支定界算法求解，得到了鲁棒模型的最优解。数值结果显示，在模型中考虑到达时间的不确定性能够提高模型的稳定性、节约码头资源、缩短船舶在港时间，从而降低集装箱码头的运营成本。

关键词：集装箱码头；泊位分配；岸桥调度；鲁棒优化

RESEARCH ON THE BERTH ALLOCATION AND QUAY CRANES SCHEDULING PROBLEM IN CONTAINER TERMINALS UNDER DATA UNCERTAINTIES

ABSTRACT

Berth and quay cranes are two important scarce resources in container terminal. Berth is one of the main "bottleneck" to shorten the berthing time. Quay cranes is the core of the whole logistics operation. At present, many scholars only research the single scheduling in container terminal operation ignoring the influence of the handing time and waiting due to the assignment of quay cranes. With the continuous development of economy, the integrated berth and quay cranes scheduling problem has been the main trend. The coordination scheduling of berth and quay cranes not only can satisfy real constraints, but also can save cost. Based on the existing problems in the current scheduling, this paper established a deterministic berth – quay cranes joint scheduling model. Considering actual operation, the arrival time of ships, the workload, the failure of terminal equipment, weather, operator proficiency factors changing all can affect the established plan. They may reduce the work efficiency, increase the additional investment costs. Therefore, it is important to propose feasible mathematical model to handle uncertain factors to decrease the adjustment of scheduling. Robust optimization is one important method to handle uncertain problems and it is different from other stochastic programming optimization methods, which need not to know the accurate distribution of the parameters.

Considering the arrival time as uncertain factor, this paper proposes an integrated berth and quay crane robust optimization model. The optimal solution is obtained by the brand and bound algorithm. Numerical result shows that the model and algorithm can shorten the berthing time, save the terminal resources and decrease the terminal costs.

KEYWORDS: Container terminal; Berth allocation; Quay cranes scheduling; Robust optimization

目 录

第一章 绪论

§1.1 引言

随着经济贸易全球化进程的不断加快，集装箱运输业呈现蓬勃发展的态势。近年来，国际集装箱码头的吞吐量迅猛增加，码头的重要性及其战略地位不断得到提升。图 1.1 显示了 2011-2015 年第三季度我国港口的集装箱总吞吐量，图 1.2 显示了这几年三季度我国沿海与内陆集装箱的吞吐量。数据显示，我国港口集装箱总吞吐量不论是沿海，还是内河都在稳步增加。由数据计算得出，我国 2012 年三季度港口集装箱总的吞吐量与上年该季度同比增长最快为 6.77%。但就沿海港口的吞吐量而言，我国 2013 年三季度同比增速最快为 7.05%。内河港口的吞吐量依旧是 2012 年三季度同比增长最快为 11%。面对如此飞速的增长，对集装箱码头来说既是机遇，又面临着新的挑战，这对集装箱码头资源的利用率便提出了更高的要求。泊位是集装箱码头有限的资源，岸桥是码头资源中最昂贵的设备之一。怎样充分有效的利用泊位与岸桥资源、减少船舶的在港时间、提升码头的利用率、保障其服务质量、提高自身竞争能力，是决策者获利的关键。但对于各大港口物流系统来说，竞争的决定性因素在于靠泊延迟与装卸费用。泊位、岸桥作为整个系统的一部分，要使得其得到充分的利用，就必须得考虑船舶动态的到达且遵循先到先服务的原则。如果能与时俱进考虑不确定因素的影响，按照现代物流业系统的要求来规划调度这两种资源，就能提高港口运输能力、扩大港口运输的服务范围、增强国际竞争力、抢得先机。

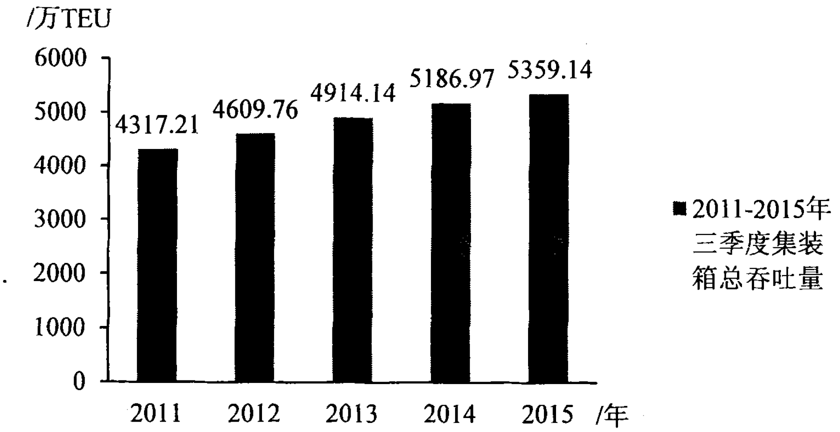

图 1.1 2011-2015 年三季度集装箱总量统计图

Fig.1.1 The third quarter container quantity statistics in 2011-2015

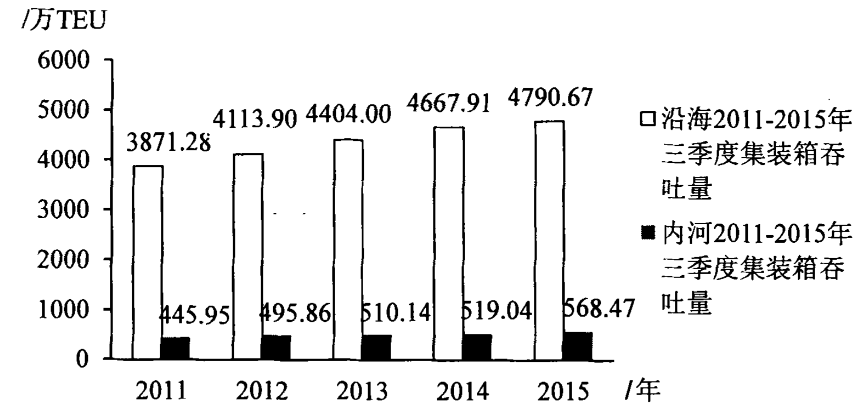

图 1.2 2011-2015 年三季度沿海与内河集装箱统计图

Fig.1.2 The third quarter coastal and inland container statistics in 2011- 2015

虽然经济全球化的进程使得集装箱运输系统发展迅速，但在此趋势下如何高效的利用资源，节省成本，仍是集装箱码头作业调度亟待解决的问题。集装箱码头的重要资源主要是泊位、岸桥、集卡、龙门吊、堆场这五类资源构成。集装箱码头的主要作业是：船舶靠泊后，岸桥将集装箱从船上卸到码头上，搬运到集卡上，再水平运输到堆场，待堆场集装箱正确摆放后，再运输出去；或者将集装箱从内陆运输到码头堆场，由集卡水平运输至码头泊位，通过岸桥将其装到船上运输的过程，见图 1.3。

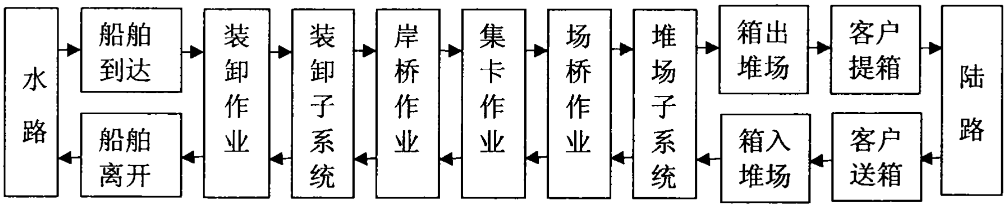

图 1.3 港口物流系统图

Fig.1.3 Port logistics system

理想状态下，集装箱的运输按既定的计划进行。在实际情况下，计划期内到港船舶会遇到各种无法预知因素的影响，如恶劣天气、作业中的事故、岸桥的故障、上一港口延误等。这些因素的改变都会导致实际到港时刻的变化，实际装卸时间的不同。如果船舶提前到港，必须在锚地等待，待泊位被分配好后再靠泊；如果船舶延迟到港，原装卸计划均需延后进行，这使得既定计划无法顺利实施。因此，集装箱服务能力和运输需求这两者之间很难达到供需平衡。这样就造成集装箱码头资源的浪费。只有合理利用好港口的有限资源，实现泊位、岸桥的实时协调优化，才能缩短船舶的在港时间、节约资源、节省成本、提高港口系统整体性能的发挥。对于决策管理者来说，使集装箱码头能够及时规避风险，获得较高的经济效益，选择合理的调度方案尤为重要。因此，根据现实情况对码头作出多种预定计划，进行合理的规划设计港口资源的配置，其意义重大。

§1.2 泊位与岸桥整合调度的意义

泊位是用来停靠船舶的位置，通常船舶以某种方式到达港口，港口以泊位为之提供服务。理想的调度方案是港口的所有泊位都处于闲置状态，到港的船舶也无须等待，到港后即可靠泊装卸，而无须排队。岸桥是用来装卸集装箱的工具，通常船靠泊后由岸桥为其提供装卸服务。合理的调度方案可以减少船舶的装卸时间、提高岸桥的装卸效率。泊位与岸桥是集装箱码头两种稀缺资源，彼此相互制约。合理的分配有助于决策者节约资本，获得丰厚利益。泊位配问题(Berth Allocation Problem，BAP)即船舶到港前（或后），码头的泊位布局和计划服务的船舶的一些信息已知。码头调度人员根据各个泊位的空闲情况、物理条件的约束、实际到港时间等信息为船舶安排最佳靠泊位置和最优靠泊顺序的优化问题。岸桥调度问题（Quay Crane Scheduling Problem，QCSP）即确定泊位后，根据集装箱的装卸数量以及岸桥的空闲状态，合理的安排岸桥为船舶进行装卸服务的调度优化问题。资源分派中，岸桥的调度计划必

须与泊位的分配计划一致。岸桥的操作能力决定船舶所分配的泊位，反过来所分配的岸桥将影响下一艘船舶的停靠位置。因此，制定合适的计划，合理协调规划泊位和岸桥的分配与使用至关重要。但在现实中，由于船舶到港的随机性、船舶类型的多样性、货物品种和货量的多变性，导致了问题研究的复杂性。港口如果仅以泊位能力充分利用来考虑建设泊位，当船舶密集到达时，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，船、货在港积压等因素将造成经济损失。因此为了减少船舶等待泊位、船舶排队，港口必须扩大建设规模、加大投资多建设泊位或投建高效专业化泊位。然而，当船舶、货物到达减少时，将出现泊位空闲，也会造成港口建设投资被闲置的浪费。因此，船舶的到达分布、靠泊时间（主要是装卸服务时间）分布、泊位数、待泊的船舶数、泊位利用率以及岸桥的利用之间都有着密切的关系。如果船舶到达多而泊位数少、可利用的岸桥数少，船舶的待泊时间就会增加，其结果船舶延期费用就增加；如果泊位数充裕，岸桥分配合理，就会缓解滞留现象。这样虽不会发生船舶待泊现象，但因泊位建设投资过大。因此，合理分配岸边泊位、实时调度岸桥资源，研究泊位、船舶、岸桥、货物在港周转期间所发生的时间或者总损失费用最小的条件下，求经济上最佳的泊位投资规模势在必行。同时优化决策泊位和岸桥的集成调度问题意义非凡。

§1.3 泊位-岸桥鲁棒优化的意义

理想的状态下，港口各项调度会按原计划顺利进行。然而，实际操作中，天气、码头设备故障、工作量等因素都存在变化的可能，任一因素的改变都将导致预先制定的调度方案无法顺利进行。管理人员不得不对突发状况进行临时的调整，牵一发就会动全身，更何况泊位与岸桥等大型资源的调整。毋庸置疑，这种调整从时间上来说，降低了码头的运作效率；从经济成本上来讲，增加了额外的预算。因此，找到在动态不确定环境下具有抗干扰能力的优化决策方案势在必行。鲁棒优化是现阶段考虑不确定性因素的干扰，对确定性问题进行优化的一种建模方法。它不同于随机规划和灵敏度分析，无需明确参数的分布，但却能找到一个满足不确定性所有情况的最优解。当它面对理想情况时，即确定性时的结果；面对最坏情况时，即一个最保守的结果。故研究不确定情况出现时泊位与岸桥的联合调度问题，以最小化泊位偏离惩罚成本与延迟离港惩罚成本之和为目标函数，对确定性模型进行鲁棒优化很有必要。

本文在确定性泊位与岸桥联合调度问题的基础上，考虑船舶的到港时间的不确定性，对已建立的确定性集装箱港口的泊位—岸桥联合调度模型进行了鲁棒优化。在模型中引入随机的参数变量，通过调节参数的值，求得符合约束条件的最优整数解。最终目的在于应对外界变化，规避风险。根据外界不确定因素变化所引起的相应模型结果的改变，从而分析给出合理的调度规划建议。为决策者提供多样的选择，合理的调度计划可以提高我国运输需求的能力、节约成本、丰盈国库，增强我国的综合国力，具有较强的应用价值。

§1.4 本章小结

本章分析了近年来我国三季度集装箱码头的港口集装箱吞吐量的基本现状以及增长速度。通过对目前港口物流系统的现状、基本流程的研究，确定了泊位—岸桥联合调度的意义。通过对目前现状的分析，重点突出将到港时间作为不确定因素对泊位与岸桥的确定性模型进行鲁棒优化的意义，以及对实际生活产生的影响。

第二章 文献综述

近年来，港口重要资源间的整合调度研究颇受重视。泊位与岸桥作为港口关键的岸边资源，对其整合调度的研究也不例外。目前而言，确定性泊位与岸桥的研究基本上已经饱合，不确定条件下的泊位与岸桥的研究还有待进一步的研究。泊位调度和岸桥资源实行协调调度，合理分配资源很大程度上会影响码头的整体功能。因此，合理规划泊位、岸桥这两类资源显得尤为重要。

§2.1 泊位分配研究现状

Edmond 等首次对集装箱码头的泊位调度进行研究[1]，之后 Imai 等研究了静态变量的离散型 BAP，建立使得加权总等待时间与作业时间最小的混合整数规划模型，用拉格朗日松弛算法分析其性能并求得最优可行解[2]。基于研究现状，同年 Nishimura 等针对动态的泊位分配问题，提出遗传算法对加入水深、船长等物理约束后的模型进行了求解[3]。Imai 等后来针对动态离散性泊位问题（BAPD）进行了研究，在一个服务时间周期内，允许船舶动态到港停泊，以最小化船舶在港停留时间为目标建立模型，采用拉格朗日松弛算法求解得到了该问题的最优解[4]。在动态 BAP 研究的热潮中，Guan 等以最小化作业船舶的加权总在港时间为目标的建模，采用启发式算法对所建模型求出了最优的决策方案[5]。Kim 等以最小化港口延迟总罚金为目标，建立模型并采用模拟退火算法求解了该泊位分配问题[6]。经过不断的探索研究，Kim 等接着以最小化船舶的总惩罚成本为目标，建立动态下的连续 BAP 模型，采用模拟退火方法对新问题进行了求解[7]。Wang 等考虑船舶滞港时间的惩罚成本最小化，建立多阶段决策的任务调度模型，提出集束搜索算法对所建模型进行求解，得到了该问题的最优解[8]。随着泊位分配问题研究的日趋成熟，Hansen 等以最小化延迟离港时间为目标建立整数规划模型，提出了遗传算法、迷因搜索算法对该问题进行了求解[9]。Zhen 等在考虑船舶的到达时间与操作时间不确定的基础上，建立两阶段的整数规划模型，并采用启发式算法求解得到了该问题的最优解[10]。

§2.2 岸桥调度研究现状

岸桥调度问题主要考虑岸桥的数量、岸桥的工作区域这两方面。Bierwirth 等建立了改进的调度优化模型，采用了启发式算法并利用分支和边界搜索来解决该岸桥调度问题[11]。Zhu 等建立了单向 QCSP 的优化模型，提出了有限容量的分支定界算法并行模拟退火算法来解决该问题[12]。Lee 等人采用改进的遗传算法、贪婪算法来求解单向 QCSP 问题的最优值[13][14]。通常集装箱码头作业中的泊位停靠、岸桥配置以及岸桥的分配都是互相影响的。因此，合理的协调规划调度好泊位与岸桥这两类资源能够提高码头作业的效率，为决策者获得可观的经济效益。

§2.3 泊位与岸桥联合调度研究现状

面对科技高速发展给现实带来的挑战，Park 和 Kim 脱颖而出，最先研究了 BAP 和 QCSP 的整合优化调度，他们以船舶的总作业成本为目标建模，提出拉格朗日松弛算法求解得到了该问题的最优解[15]。蔡芸等以船舶总在港时间为目标，建立泊位与岸桥的仿真优化调度模型，采用遗传算法进行仿真求解，成功寻得该模型的最优解[16]。岸桥是可以沿岸线灵活移动的设备，数量的增加会改变岸桥的服务时间，多数学者为方便研究通常不考虑岸桥的相互干扰，以至于得到的调度计划并不理想。基于存在的这些不足，Imai 等在离散的 BACAP 问题中将岸桥的干扰考虑在内，以船舶总在港时间为目标建模，采用遗传算法对所建模型求解得到最优解[17]。Lu 等以船舶的操作时间和等待时间之和为目标，建立连续的 BACAP 模型，采用并行遗传算法对所建模型求解，成功寻得该模型的最优解[18]。Chen 等考虑最小化最大的延迟比模型，提出了新的削减算法来求解问题的最优解，并用数值例子验证了算法的有效性与可行性[19]。Liang 等把岸桥移动次数最小化看成决策问题，提出最小化岸桥移动次数为目标，设计了多目标遗传算法对泊位和岸桥联合调度问题进行研究，成功求解得到了该问题的最优决策调度方案[20]。Meisel 等以最小化船舶总的服务费为目标建立混合整数规划模型，采用启发式算法成功求得问题的最优解，并用数值实验验证了算法的优越性[21]。Lee 等针对泊位与岸桥，建立离散的混合整数规划模型，采用遗传算法对所建模型求解，并用算例验证了算法的有效性[22]。Han 等以最小化船舶的总作业时间为目标，建立动态、离散的协调调度模型，并用遗传算法对该模型进行求解，数值算例验证了模型的可行性与算法的有效性[23]。韩俊等弥

补了离散化求解得不足，建立了连续的泊位与岸桥的整合调度优化模型，采用免疫遗传算法成功获得了该模型的最优解[24]。Zhang 等在泊位离散化的条件下，建立了泊位和岸桥资源的协同优化调度模型，并用梯度优化法进行了求解，验证了模型与算法的有效性[25]。Chang 等以最小化船舶总延时的惩罚成本为目标，建立了基于滚动规划的整数规划模型，用混合并行遗传算法与启发式算法得到了问题的最优解[26]。周鹏飞等以最小化船舶的等待时间为目标，建立了动态的泊位和岸桥的优化模型，用 CPLEX 软件验证了模型的正确性，并用改进的遗传算法求解得到了该问题的最优解[27]。李娜将泊位分配、岸桥分配和岸桥调度同时考虑，建立多船多任务的优化模型，分别用三种算法求解得到了所建模型的最优解，数值算例验证了算法的有效性[28]。Xu 等以最小化延迟时间和鲁棒缴中时间为目标，建立泊位和岸桥的鲁棒优化调度模型，采用模拟退火并行分支定界法来求解成功得到了该模型的最优解[29]。桂小娅基于实际的约束，建立了确定的离散化泊位、岸桥整数规划模型，通过添加缓冲时间将模型进行了鲁棒优化。模型鲁棒之后分为两个阶段—初始调度计划阶段和基础调度计划阶段。她在上层模型采用自适应遗传算法，下层模型采用局部搜索启发式算法。通过双层循环迭代求解得到符合客观实际的最优决策方案，数值实验的分析证明了模型的可靠性与算法的优越性[30]。

但在实际操作中，进入泊位的船舶有时候需要跨越不同的泊位停泊，因此采用连续泊位空间对泊位分配更具有柔性，对码头运营方来说也能提高其利用率与经济效益。鲁棒优化是近年来解决不确定性问题的一种新方法。在鲁棒过程中，通过引入新参数，不断调节不确定因素的鲁棒程度，力求减低不确定因素的改变对实际操作产生的影响。对于港口调度问题来说，天气、船舶的到达时间、装卸操作时间、设备故障等因素都是未来不可预知的，都可能成为不确定性因素。因此，在不确定的条件下，对泊位调度与岸桥配置的协调优化的研究，更加具有现实意义。

§2.4 本章小结

本章对近年来关于泊位、岸桥的单独调度，以及泊位—岸桥联合调度方面的研究文献作了简单的叙述。通过对前辈文献的分析与研究，深入了解到当前港口物流系统中泊位—岸桥所处的地位与现状，明确对其进行研究的必要性。为下文问题的提出、假设、建模与求解做了铺垫。

第三章 问题假设与模型建立

§3.1 问题描述

一般情况下，船舶抵港前，码头工作人员会根据预计的船舶到港时间及其相关信息为船舶安排靠泊计划。当船舶靠泊时，根据既定计划直接为船舶安排停靠泊位和可用岸桥即可。然而，泊位是港口生产运输作业的决定因素，泊位的分配取决于岸桥的工作能力，反之，岸桥的分配也影响着下艘船的靠泊。此外，岸桥与泊位相辅相成，在船舶分配泊位的同时考虑岸桥的相关调度对码头运作效率有事半功倍的效果。船舶的停靠泊位分配若不合理，将会导致岸桥的工作效率下降，从而影响船舶在港时间。图 3.1 为泊位和岸桥单独调度的过程图，。

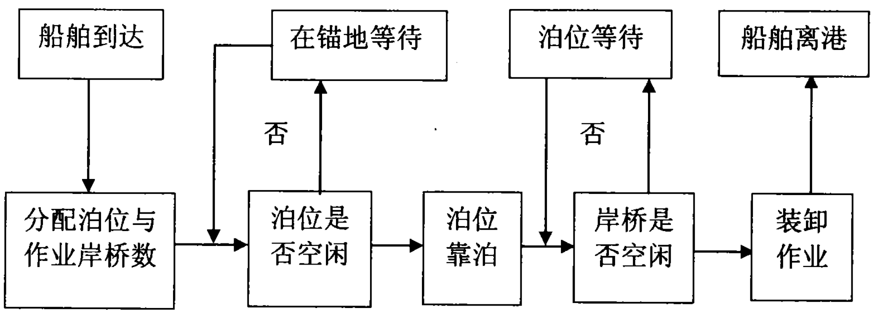

图 3.1 泊位与岸桥单独调度图

Fig.3.1 Single schedule of the berth and quay crane

单独调度是指泊位操作和岸桥操作流程分成两个阶段来作业。必须先为停靠船舶安排合适的泊位，以使得船的等待时间最少，船靠泊后再为其配置适当的岸桥来装卸集装箱。到港的船舶必须按顺序装卸作业。如果此时泊位都被占用，则该船须待泊，直到先来的船离开泊位为止。显然单独调度忽略了配置岸桥的数目对船舶在港口被服务的时长，使得等待装卸船舶的时间持续较长，影响码头的整体效能，具有局限性。联合调度是指综合考虑闲置泊位和空闲的岸桥，决策出最少到港停留时间的泊位调度和岸桥配置。这两个工作过程中，配置岸桥数量的不同会影响正在装卸的船舶和等待装卸船舶到港停留的时长。图 3.2 为泊位与岸桥协调调度流程图。协调调度将两者综合考虑，避开了单独调度的弊端，能够提高码头的整体工作能力，减少船舶服务时间，提高了工作效率。使得集装箱码头作业系统能有序、顺利的完成既定的任务。

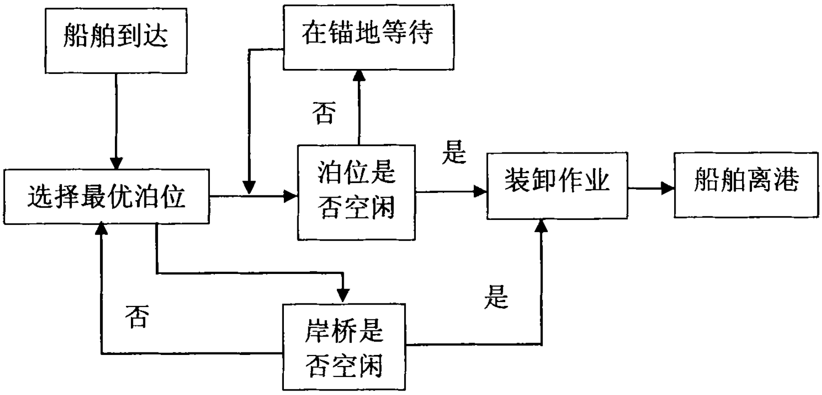

图 3.2 泊位与岸桥协调调度图

Fig.3.2 The coordination scheduling of berth and quay crane

§3.2 泊位与岸桥联合调度模型

本文在确定性泊位与岸桥联合调度模型的基础上，将船舶的到达时间作为不确定性因素，建立了岸桥干扰或不干扰时，泊位与岸桥联合调度的鲁棒优化模型。

§3.2.1 模型假设

理想情况下，到港的船舶到指定泊位按先后顺序进行装卸作业，如果泊位都被占用时，就必须待泊到先来的船离开泊位为止。在现实生活中，存在大量的不确定因素导致意外情况的发生，以至于既定计划无法顺利完成。此时，管理人员必须对突发状况进行合理的整顿，但是，泊位和岸桥作为码头所有作业最为关键的环节，影响着其他作业的顺利进行。因此，临时的操作必然导致码头工作效率的降低，影响码头整体效能，甚至造成无法挽回的经济损失。本文将船舶到港时间的不确定考虑在内，研究了不确定性泊位—岸桥的鲁棒性联合调度问题。基于以下建模假设：

（1）每条船有一个理想泊位；

（2）船舶按既定计划到港，即船舶到港时间已知，由船期表或船公司确定；

（3）船舶的靠泊需满足物理条件上的限制；

（4）不考虑船舶在泊位间的移动，每个船舶有且只有一次靠泊机会；

（5）每艘船都有最大和最小可分配的岸桥数目；

（6）岸桥间不能相互跨越；

（7）不考虑岸桥作业时的相互干扰（或考虑岸桥相互干扰）；船舶在靠泊时，船舶与船舶间必须有一段安全距离，不失一般性，可将这段安全距离（与船的长度有关）加到船的长度中。

§3.2.2 符号定义

集合与下标符号定义：

V　表示船舶的集合；

Q　表示岸桥的集合；

H　表示离散化的时间段的集合；

T　表示时间的集合T={1,2,…,H-1}；

T_1　表示时间的集合T_1={1,2,…,H}。

常量符号定义：

M　表示一个足够大的正常数；

L　表示离散码头船舶的泊位总长度（每10m为一个单位）；

p_i　表示船舶i的最优靠泊位置；

a_i　表示船舶i的预计到达时间；

$\hat{a}_i$　表示船舶i的预到计达时间的数据不确定性值；

Γ　表示船舶i的预计到达时间的数据不确定性水平总值；

d_i　表示船舶i的预计离港时间；

$R_i^{\max}$　表示船舶i可被分派的最大岸桥数；

$R_i^{\min}$　表示船舶i可被分派的最小岸桥数；

l_i　表示船舶i的长度；

m_i　表示船舶i的装卸箱量，单位：岸桥工时（QC-hours）；

c_{1i}　表示船舶i的单位偏离泊位的惩罚系数，即船舶i偏离其偏好位置上一个单位位置造成的惩罚成本；

c_{2i} 表示船舶 i 的单位延迟离港处罚系数，即船舶 i 相对其规定离港时间延迟一个单位时间所造成的惩罚成本。

决策变量定义：

x_i 表示船 i 的实际靠泊位置；

Δp_i 表示船 i 与最佳泊位的距离差；（$|x_i - p_i| = \Delta p_i$）

s_i 表示船 i 的开始服务(靠泊)的时间；

f_i 表示船 i 的完成服务(离港)的时间；

D_i 表示延迟离港时间，$f_i - d_i \ge 0$ 时表示为 D_i^+，否则为 D_i^-；

$y_{ij} \in \{0, 1\}$ 表示如果船 i 停在船 j 的前面为 1，否则为 0；（$b_i + l_i < b_j$）

$z_{ij} \in \{0, 1\}$ 表示如果船 i 在船 j 开始作业前完工为 1，否则为 0；（$f_i < s_j$）

$r_{it} \in \{0, 1\}$ 表示如果船 i 在 t 时刻有岸桥为之服务为 1，否则为 0；

$r_{itq} \in \{0, 1\}$ 表示如果船 i 在 t 时刻有 q 个岸桥为之服务为 1，否则为 0。

§3.3 模型建立

§3.3.1 不考虑岸桥干扰的建模

以最小化船舶惩罚成本为目标函数，建立确定性的泊位—岸桥（不考虑岸桥干扰）优化模型。

$$\min \quad Z=\sum_i \left(c_{1i} \cdot \Delta p_i + c_{2i} \cdot D_i^+\right) \tag{3.1}$$

$$\text{s.t.} \quad f_i - d_i = D_i^+ - D_i^- \qquad \forall i \in V \tag{3.2}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{itq} \ge m_i \qquad \forall i \in V \tag{3.3}$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{q \in R_i} q \cdot r_{i(H-1)q} \le Q \qquad \forall t \in T \tag{3.4}$$

$$\sum_{q \in R_i} r_{itq} = r_{it} \qquad \forall i \in V，\ t \in T \tag{3.5}$$

$$\sum_{t \in T} r_{it} = f_i - s_i \qquad \forall i \in V \tag{3.6}$$

$$(t+1)\cdot r_{it} \le f_i \qquad \forall i \in V,\ t \in T \qquad (3.7)$$

$$t \cdot r_{it} + H\cdot(1-r_{it}) \ge s_i \qquad \forall i \in V,\ t \in T \qquad (3.8)$$

$$s_i \ge a_i \qquad \forall i \in V \qquad (3.9)$$

$$x_i - p_i \le \Delta p_i \qquad \forall i \in V \qquad (3.10)$$

$$p_i - x_i \le \Delta p_i \qquad \forall i \in V \qquad (3.11)$$

$$x_j + M\cdot(1-y_{ij}) \ge x_i + l_i \qquad \forall i,j \in V,\ i \ne j \qquad (3.12)$$

$$s_j + M\cdot(1-z_{ij}) \ge f_i \qquad \forall i,j \in V,\ i \ne j \qquad (3.13)$$

$$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \ge 1 \qquad \forall i,j \in V,\ i \ne j \qquad (3.14)$$

$$f_i \in T_1,\ s_i \in T \qquad \forall i \in V \qquad (3.15)$$

$$x_i \in \{0,\ 1,\ldots,\ \mathrm{L}-l_i\} \qquad \forall i \in V \qquad (3.16)$$

$$r_{it},\ r_{itq} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in V,\ t \in T,\ q \in Q \qquad (3.17)$$

$$y_{it},\ z_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in V \qquad (3.18)$$

$$q \in \left[R_i^{\min}, R_i^{\max}\right],\ D_i^{+} \ge 0,\ D_i^{-} < 0 \qquad \forall i \in V \qquad (3.19)$$

表 1 模型说明

Table 1 Specification of a model

公式	描述
（3.1）	目标函数：泊位偏离的惩罚成本与延迟离港的惩罚成本之和
（3.2）	变量 D_i^{+} 和 D_i^{-} 的约束条件
（3.3）	确保每艘到港船舶的作业量都满足要求
（3.4）	确保任意时刻作业中的岸桥数之和不得超过可选岸桥的总数
（3.5）	确定了 r_{itq} 和 r_{it} 之间的关系
（3.6）	定义了船舶的开始服务时间与结束服务时间的差值
（3.7）-（3.8）	确保船舶作业服务完成方可离港
（3.9）	确保船舶的开始工作时间在到达时间之后
（3.10）-（3.11）	定义了泊位偏差

（3.12）-（3.13）	定义了任意两船之间的靠泊位置与先后顺序
（3.14）	确保任意两船在时间和空间上不发生冲突
（3.15）-（3.19）	均为变量的取值范围

§3.3.2 岸桥干扰情况下的建模

以最小化船舶惩罚成本为目标函数，建立确定性的泊位—岸桥（考虑岸桥干扰）优化模型。

目标函数与其余的约束均不变，只将约束（3.3）用含有岸桥干扰的约束替换即可。引入岸桥干扰指数α（$0\le\alpha\le1$）与泊位偏差系数β。每小时安排q个岸桥给一艘船，则需要q^{α}个岸桥作业时间，装卸作业工时m_i会因作业效率的下降而隐性增加。作业时，随着岸桥工作数量的增多，岸桥的工作效率会受到干扰。式$(1+\beta)\Delta p_i\cdot m_i$中，当$\beta$=0.01时，泊位偏离 1 单位(10m)，表示岸桥的干扰指数每增加百分之一，岸桥的装卸作业工时便在会增加1%。将（3.3）替换成下式：

$$\sum_{t\in T}\sum_{q\in R_i} q^{\alpha}\cdot r_{itq} \ge (1+\beta)\Delta p\cdot m_i \qquad \forall i\in V \tag{3.20}$$

约束（3.20）确保在岸桥干扰的情况下，每艘到港船舶的作业量均可以满足要求。此时便得到了确定性的泊位—岸桥（考虑岸桥干扰）优化模型。

$$\min \quad Z=\sum_i\left(c_{1i}\cdot\Delta p_i+\mathrm{c}_{2i}\cdot D_i^{+}\right) \tag{3.21}$$

s.t. （3.2），（3.4）-（3.20）。

§3.4 本章小结

本章针对问题的描述与假设，在岸桥干扰与岸桥不干扰的情况下，建立了相应的确定性泊位与岸桥的优化模型。并对文中模型用到的符号做了详细的解释说明。考虑不同情况下的建模，结合下文的数据实验进行对比选择最优方案，更具现实意义。

第四章 模型的鲁棒

§4.1 鲁棒优化的定义

传统的优化方法在面对内部参数发生变动或有外界扰动时，原有模型可能无最优解甚至不可行，其最终结果总是与现实状况有所偏差。因此，需要一种专门研究不确定问题的方法，这时鲁棒优化方法便备受信赖。鲁棒优化是近年来一种新的处理数据不确定性问题的方法，它是解决优化问题的一种新型建模方法。在鲁棒过程中，将原有问题中可能的不确定因素考虑在内，将新的参数加入到约束中，求解得到具有优良性能的解。这种方法无需对决策变量进行分布假设，面对最坏的情况下，仍有一个保守的解。鲁棒优化无需知道其参数分布，这在计算上要优于随机规划和灵敏度分析等优化方法，它的目的是求得对于可能出现的所有情况，约束条件均满足，且最坏情况下模型的目标值仍最优。鲁棒的关键是将原问题中引入不确定性参数，通过调节参数的取值来分析鲁棒整体的性能，使得找到当系统的内部组成和外部区域均发生变动后，依然能维持其整体性能不受影响的最优解。

§4.2 鲁棒优化的过程

一般的数学规划的形式为

$$\min_{x_0\in R, x\in R^n}\{x_0 : f_0(x,\xi)-x_0\le 0, f_i(x,\xi)\le 0, i=1,...,m\}$$

其中 x 为设计向量，f_0 为目标函数，$f_1,f_2,...,f_m$ 是问题的结构元素。ξ 表示属于特定问题的数据。U 是数据空间中的某个不确定的集合。对于一个不确定问题的相应的鲁棒问题为

$$\min_{x_0\in R, x\in R^n}\{x_0 : f_0(x,\xi)-x_0\le 0, f_i(x,\xi)\le 0, i=1,...,m, \forall\xi\in U\}$$

求得上述问题的可行解即为不确定性问题的鲁棒可行解，最优解也即鲁棒最优解。鲁棒的关键是对确定性问题中含有不确定性因素的约束项引入新参数，建立鲁棒优化模型，利用等价、对偶的优化理论将模型转化为可求解的“近似”鲁棒对等模型。并给出鲁棒最优解。

对一个名义线性规划问题：

$$\max \quad \mathbf{c}^T\mathbf{x}$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{Ax} \le \mathrm{b} \tag{4.1}$$

$$\mathbf{l} \le \mathbf{x} \le \mathbf{u}$$

如果数据的不确定性只在矩阵**A**中出现，**c**是目标函数的系数，是确定的。不失一般性，引入松弛变量**z**，目标最大化**z**，增加约束$\mathbf{z}-\mathbf{c}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}\le 0$，这个约束也包括$\mathbf{Ax}\le \mathrm{b}$。

把矩阵**A**中第i行的所有系数不确定的集合记为J_i，对于任意的a_{ij}，$j\in J_i$用边界随机向量$\tilde{a}_{ij}$来替换，$\tilde{a}_{ij}\in\left[a_{ij}-\hat{a}_{ij},a_{ij}+\hat{a}_{ij}\right]$，$a_{ij}$为名义值。定义随机变量$\eta_{ij}=(\tilde{a}_{ij}-a_{ij})/\hat{a}_{ij}$，$\eta_{ij}$在[-1，1] 内取值，为对称分布的随机变量。于是便有如下鲁棒模型：

$$
\begin{aligned}
\max \quad & \sum_j a_{ij}x_j & & \\
\text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij}x_j+\sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j\right|\le b_i & \forall i & \qquad (4.2)\\
& l_j\le x_j\le u_j & \forall j &
\end{aligned}
$$

等价转化为

$$
\begin{aligned}
\max \quad & \sum_j a_{ij}x_j & & \\
\text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij}x_j+\sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}y_j\le b_i & \forall i & \\
& -y_j\le x_j\le y_j & \forall j & \qquad (4.3)\\
& l_j\le x_j\le u_j & \forall j & \\
& y_j\ge 0 & \forall j &
\end{aligned}
$$

令x^*是（4.3）的最优解，即$y_j=\left|x^*\right|$，于是有$\sum_j a_{ij}x_j^*+\sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|\le b_i$，$\forall i$。该最优解对于不确定性参数的集合$\tilde{a}_{ij}$均可行，此时得到的模型就是鲁棒的，即有

$$\sum_j \tilde{a}_{ij}x_j^*=\sum_j a_{ij}x_j^*+\sum_{j\in J_i}\eta_{ij}\hat{a}_{ij}x_j^*\le\sum_j a_{ij}x_j^*+\sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|\le b_i \qquad \forall i$$

对于第i个约束，$\sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}\left|x_j^*\right|$通过保持$\sum_j a_{ij}x_j^*$和$b_i$之间的间隙而给予约束“必要”的保护。尽管 Soyster 的方法保证了不确定性参数在其取值范围内均满足约束条件，其保守性最强[31]。

然而，对于极大化问题，该方法使得目标函数值显得过小；对于极小化问题，该方法使得目标值显得过大，保守性又太强。Ben-Tal 和 Nemirovski 为避免得到这两种极端方案，针对问题（4.1）提出了新的鲁棒模型[32]：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_j a_{ij} x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} y_{ij} + \Omega_i \sqrt{\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}^2 \cdot z_{ij}^2} \le b_i \ \mathrm{i} & \forall i \\ & -y_{ij} \le x_j - z_{ij} \le y_{ij}, 0 \le z_{ij} \le 1 & \forall i, j \in J_i \\ & l_j \le x_j \le u_j \\ & y_j \ge 0 \end{aligned} \tag{4.4}$$

在模型的数据不确定性为U的情况下，第i个约束不满足要求的最大概率为$\exp(-\Omega_i^2/2)$。鲁棒模型（4.4）的保守性比模型（4.3）的要弱，因为模型（4.3）的每一个可行解都是模型（4.4）的可行解。上式中$\Omega > 0$为模型的保守性水平参数值，由决策者事先给定。显然对于模型（4.4）一个非线性的二次凸锥规划，计算复杂度较大。 为了简化问题，方便求解，学者们又重新考虑线性规划问题（4.1），令J_i是系数矩阵**A**的第i行的所有不确定参数a_{ij}组成的集合，将每个不确定的a_{ij}，$j \in J_i$用$\tilde{a}_{ij} \in \left[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}\right]$来代替，$\tilde{a}_{ij}$为有界对称的随机变量。对于每个约束$i$，引入参数$\Gamma_i$来调节整数解的保守性水平，$\Gamma_i$不一定要取整数，按照研究问题的要求来取值，新参数$\Gamma_i$在$[0,|J_i|]$取值。现实中虽存在诸多不确定性因素，但不可能所有的数据都是不确定的，所以让不确定数据a_{ij}，$j \in J_i$中$\lfloor \Gamma_i \rfloor$个系数在$\left[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}\right]$内变化，另一个系数在$\left[a_{ij} - (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor)\left|\hat{a}_{ij}\right|, a_{ij} + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor)\left|\hat{a}_{ij}\right|\right]$内变化，但不指定是哪$\lfloor \Gamma_i \rfloor$个在$\left[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}\right]$内变化，哪$|J_i| - \Gamma_i$个系数值保持不变。当得到的鲁棒最优解可行且不确定性数据的变化超过$\lfloor \Gamma_i \rfloor$个时，也能保证鲁棒解在很大的概率程度上是可行的。

此时的鲁棒对应式如下：

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_j a_{ij} x_j \\
\text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij} x_j + \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \{\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} y_j + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{it_i} y_t\} \le b_i & \forall i \\
& -y_j \le x_j \le y_j & \forall j \in J_i \\
& l_j \le x_j \le u_j \\
& y_j \ge 0
\end{aligned} \tag{4.5}$$

如果Γ_i是整数，那么第i个约束被$\beta_i(x,\Gamma_i) = \max_{\{S_i | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \Gamma_i,\}} \{\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} |x_j|\}$所保护。当$\Gamma_i = 0$时，$\beta_i(x,\Gamma_i) = 0$，即代表第$i$个约束是确定的，第$i$个约束便成为了名义约束。当$\Gamma_i = |J_i|$时，即代表满足$i$个约束均变化的所有情况，保守性最强。该模型也就成了 Soyster 模型。通过调整Γ_i在$[0,|J_i|]$的取值可以调节鲁棒解的保守性水平，为了使鲁棒对应式（4.5）进一步转化为线性规划模型，给定一个x^*，若令

$$\beta_i(x^*,\Gamma_i) = \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \{\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} |x^*| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{it_i} |x_{t_i}^*|\} \tag{4.6}$$

则$\beta_i(x^*,\Gamma_i)$等价于下面问题的最优目标值：

$$\begin{aligned}
\max \quad & \beta_i(x^*,\Gamma_i) = \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j^*| \cdot z_{ij} \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{j \in J_i} z_{ij} \le \Gamma_i \\
& 0 \le z_{ij} \le 1 & \forall j \in J_i
\end{aligned} \tag{4.7}$$

这样，鲁棒对应式（4.5）便可转化为鲁棒优化模型（4.8）。

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_j a_{ij} x_j \\
\text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij} x_j + z_i \cdot \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \le b_i & \forall i \\
& z_i + p_{ij} \ge \hat{a}_{ij} \cdot y_j & \forall i, j \in J_i \\
& -y_j \le x_j \le y_j & \forall j
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$l_j \le x_j \le u_j \qquad \forall j$

$p_{ij} \ge 0 \qquad \forall i, j \in J_i$

$y_j \ge 0 \qquad \forall j$

$z_i \ge 0 \qquad \forall i$

§4.3 鲁棒优化的特点

鲁棒优化是专门用来研究数据不确定性问题的一种方法，它通过调节引入参数的变化值，求解得到不同鲁棒程度下的近似最优解。能够有利的避免外界干扰的影响，强调数学期望值只是其一部分。鲁棒性是针对系统的整体机能，求出当系统的内部组成和外部区域均发生变动后，依然维持其整体性能而不受到影响的性质。鲁棒优化无需对变量进行分布假设，面对最坏的情况，仍有一个保守解支撑。因此，鲁棒优化具有一定的保守性，故而使用较广。

§4.4 模型的鲁棒

§4.4.1 岸桥不干扰时的模型鲁棒

本文将到达时间的不确定性考虑在内，对岸桥不干扰时的确定性模型进行鲁棒优化。根据鲁棒模型的特点，用 Bertsimas 的鲁棒优化方法[33]，假设到达时间以 $\hat{a}_i$ 为区间变化量，由对称性假设 $\tilde{a}_i \in \left[a_i - \hat{a}_i, a_i + \hat{a}_i\right]$。为了获得鲁棒性，引入新参数 Γ，求得在 Γ 个数据发生变化时目标函数的最优值。令 $J_0 = \{j | c_j > 0\}$，如果所有船的到达时间都不确定，那么 $|J_0| = N$。如果 $\Gamma = 0$，表示完全忽略掉到港时间偏差的影响；如果 $\Gamma = |J_0|$，表示最保守的情况，该鲁棒模型便转化为 Soyter 模型。不失一般性，$\Gamma \le |J_0|$ 的取值越高，鲁棒的代价也越大。考虑其中向量 C 中共有 Γ 个系数值发生改变，它们的取值用向量表示为 $\underset{j \in S_0}{c^T} + \max_{\{S_0 | S_0 \subseteq J_0, |S_0| \le \Gamma\}} \sum_{j \in S_0} \hat{c}_j$，有 $|J_0| - \Gamma$ 个系数值保持不变。然而在实际计划时不可能所有的船舶到达时间都发生变化。再增加参数 Γ_i 来调整解的保守性水平，使模型表现出不同程度的鲁

棒性，且有$\Gamma=\sum_{i\in V}\Gamma_i$。本文不确定性的参数仅有一个且只在约束(3.9)出现，因此令$\Gamma_i\in[0,\ 1]$，Γ_i不一定要取整数。故约束（3.9）的鲁棒对应式可以写成：

$$s_i-a_i\geq\Gamma_i\cdot\hat{a}_i \qquad \forall i\in V \tag{4.9}$$

$$\Gamma=\sum_{i\in V}\Gamma_i \tag{4.10}$$

该鲁棒对应式转化得到的模型已经是线性表达式，不需要再做等价的对偶变换。此时，确定性模型便转化成了不确定性模型。不确定模型如下：

$$\min \quad Z=\sum_i\left(c_{1i}\cdot\Delta p_i+\mathrm{c}_{2i}\cdot D_i^+\right) \tag{3.21}$$

s.t. （3.2）-（3.8），（3.10）-（3.19），（4.9）-（4.10）。

§4.4.2 岸桥干扰时的模型鲁棒

同样的将到达时间的不确定性考虑在内，对岸桥干扰时的确定性模型进行鲁棒优化。假设到达时间以$\hat{a}_i$为区间变化量，由对称性假设$\tilde{a}_i\in\left[a_i-\hat{a}_i,a_i+\hat{a}_i\right]$。同上面的鲁棒过程一样，为了获得鲁棒性，引入新参数Γ，求得在Γ个到达时间发生变化的情况下目标函数的最优值。令$J_0=\{j|c_j>0\}$，如果所有船的到达时间都不确定，那么$|J_0|=N$。如果$\Gamma=0$，表示完全忽略掉到港时间偏差的影响；如果$\Gamma=|J_0|$，表示最保守的情况，该鲁棒模型便转化为 Soyter 模型。不失一般性，$\Gamma\leq|J_0|$的取值越高，鲁棒的代价也越大。考虑其中向量C中共有Γ个系数值发生改变，它们的取值用向量表示为$c^T_{j\in S_0}+\max\limits_{\{S_0|S_0\subseteq J_0,|S_0|\leq\Gamma\}}\sum_{j\in S_0}\hat{c}_j$，有$|J_0|-\Gamma$个系数值保持不变。

然而在实际计划时不可能所有的船舶到达时间都发生变化。再增加参数Γ_i来调整解的保守性水平，使模型表现出不同程度的鲁棒性，且有$\Gamma=\sum\Gamma_i$。本文不确定性的参数仅有一个且只在约束（4.9）出现，因此令$\Gamma_i\in[0,\ 1]$，Γ_i不一定要取整数。故约束（4.9）的鲁棒对应式可以写成：

$$s_i-a_i\geq\Gamma_i\cdot\hat{a}_i \qquad \forall i\in V \tag{4.22}$$

$$\Gamma=\sum_{i\in V}\Gamma_i \tag{4.23}$$

该鲁棒对应式转化得到的模型已经是线性表达式，不需要再做等价的对偶变换。此时，

确定性模型便转化成了不确定性模型。不确定模型如下：

$$\min \quad Z=\sum_i \left(c_{1i}\cdot\Delta p_i+\mathrm{c}_{2i}\cdot D_i^+\right) \tag{3.21}$$

s.t. （3.2），（3.4）-（3.8），（3.10）-（3.20），（4.22）-（4.23）。

§4.5 本章小结

本章首先介绍了鲁棒优化的定义、过程以及优化的特点。考虑现实情况，在模型中将船舶的到达时间作为不确定因素来研究新问题。为了便于新问题的研究，提出了鲁棒优化方法。基于确定性环境下泊位—岸桥集成调度模型的特点，分别对两个模型进行了鲁棒优化。得到了相应的鲁棒优化模型。

第五章 算法设计

模型的鲁棒优化有一个希望达到的目标，存在两个或两个以上的可行方案，但是既不能确定最优和最保守方案的发生，又无法得到各种方案发生的概率。分支定界法是在不考虑变量的整数约束的情况下，通过求解相应的线性规划问题而得到最优解，选择一个合理的“界限”。然后，在可行的解空间内适当的搜索和缩小范围，通过的不断分支、剪枝求得满足约束条件的一个最优整数解，拓宽了求解范围。“分支”即把所有的可行解空间反复进行分割，使其成为了越来越小的子集，为整数规划的解空间缩小了范围，为最优解的出现创造了条件；“定界”即对每个子集内的解集计算一个目标下界，为搜索效率的提高提供了可能；“剪枝”使得越界的可行解子集被丢弃不再进行分枝。该方法灵活且便于计算机求解。因此，选用分支定界算法来求解该鲁棒优化模型。

§5.1 算法基础理论

分支定界法是指通过定界、分支、剪枝不断缩小可行解的范围，直到找到最优整数解的一种求解算法。首先，通过求解一般松弛线性规划问题得到最优解，确定为目标函数值的上限（上界）或下限（下界）。通过将非整数决策变量的最优解进行取整分支，分割成为最接近的两个整数，把问题的可行解展开如树的分支。分列条件后加入原问题中，使得原问题形成两个子问题(或分支)，再分别求解。最后经由各个分支逐步回溯，寻找得到最佳解的过程[34]。该算法采用广度优先或最小耗费优的方法，通过不断的分支、剪枝，在解空间树上搜索原问题的最优整数解。分支定界法中每一个活结点只有一次机会成为扩展结点[35]。在求解时，首先将整数规划问题去掉整数约束，得到一个松弛线性规划问题。

给定如下线性规划用分支定界法求解最优整数解时：

$$\begin{aligned}\max\ & \mathbf{c}^T\mathbf{x}\\ \text{s.t}\ & \mathbf{A}\mathbf{x}\le b\\ & \mathbf{l}\le\mathbf{x}\le\mathbf{u}\\ & \mathbf{x}\text{为整数向量}\end{aligned}\qquad (P)$$

$$\begin{aligned}\max\ & \mathbf{c}^T\mathbf{x}\\ \text{s.t}\ & \mathbf{A}\mathbf{x}\le b\\ & \mathbf{l}\le\mathbf{x}\le\mathbf{u}\end{aligned}\qquad (P_0)$$

令原问题（P）的松弛问题（P$_0$）的最优解为x^0。若x^0的某个分量x_i^0不是整数值，即线性规划的最优解不是整数，显然这个最优解就是整数解的上界。上界虽然已定，然而，可行解内的任意整数解都可以是最优整数解的下界，则（P）的整数最优解的第i个分量必定落在区域$x_i \le \lfloor x_i^0 \rfloor$或者$x_i \ge \lfloor x_i^0 \rfloor + 1$中，不断把这个空间逐步缩小，最后就能找到最优整数解。此时，原问题（P）分解被分割成如下两个子问题来求解。

$$\begin{aligned} &\max\ \mathbf{c}^T\mathbf{x} \\ &\text{s.t}\quad \mathbf{Ax} \le \mathrm{b} \\ &\qquad \mathbf{l} \le \mathbf{x} \le \mathbf{u}，\mathbf{x}\text{为整数向量} \\ &\qquad x_i \le \lfloor x_i^0 \rfloor \end{aligned} \tag{P$_1$}$$

$$\begin{aligned} &\max\ \mathbf{c}^T\mathbf{x} \\ &\text{s.t}\quad \mathbf{Ax} \le \mathrm{b} \\ &\qquad \mathbf{l} \le \mathbf{x} \le \mathbf{u}，\mathbf{x}\text{为整数向量} \\ &\qquad x_i \ge \lfloor x_i^0 \rfloor + 1 \end{aligned} \tag{P$_2$}$$

若相应的松弛线性规划问题的最优解是整数向量或者相应的松弛问题没有可行解。则该点便不需要进行分支。

记$z_m = c^T x^1$，若$c^T x^2 \ge z_m$，则对于（P$_2$）的任何一个整数可行解x都有$c^T x \ge c^T x^2 \ge z_m$，所以原问题的最优解一定不在（P$_2$）中，所以对（P$_2$）就无需进行分支，也即（P$_2$）被剪枝，并把它称为死点（或已查明），尚未查明的点称为活点。若$c^T x^2 < z_m$，则对（P$_2$）需继续进行考察。继续进行分支，若$c^T x^4 < z_m$，则记$z_m = c^T x^4$。以此类推直到找到最优的整数解为止。

§5.2 算法搜索策略

Step 1：令活节点集合为$\{O\}$（注："O"代表原问题，之后出现的正整数"k"代表分割后得到的子问题(P_k)），上界$U \to \infty$时，即当前最好的整数解为Φ；

Step 2：若活节点集合等于Φ，则转向第7步，否则，选择一个分枝点k属于活节点集合，从活节点集合中去掉点k；

Step 3：若节点k对应的松弛线性规划问题无解，转回第2步；

Step 4：若节点k对应的松弛线性规划问题的最优值满足$Z_k \ge U$时，则点k被剪枝，继续转回第2步；

Step 5：若节点k对应的松弛线性规划问题的最优解x^k满足整数要求（此时必有$Z_k \le U$），

则上界$U = Z_k$，当前最好的整数解就为x^k，转回第 2 步；

Step 6：若节点k对应的松弛线性规划问题的最优解x^k不满足整数要求，将x^k的某个非整数分量取整后生成节点k的两个后代点，令这两个后代点为活节点，并加入到活节点集合中，转回第 2 步；

Step 7：若当前最好的整数解等于Φ，即$U \to \infty$，则原整数线性规划问题无解，否则，当前最好的整数解就是原整数线性规划问题的最优解，U就是最优值，计算停止。

§5.3 模型求解

首先，给定N个作业船的集合$\{J_1, J_2, \ldots, J_n\}$。每个作业船的泊位分配与岸桥调度同时进行。作业船$J_i$的延迟离港时间为$D_i$。给定一个作业调度，设$F_i$是船$i$在完成装卸集装箱后延迟离港的惩罚成本。所有船的延迟离港惩罚成本与泊位偏差的惩罚成本的和即为所求的目标。作业调度就是要在给定的N个作业中，选择最佳的作业调度方案，使船的总惩罚成本最小。

其次，确定限界函数。整个调度过程就是要从N个作业的所有排列中找出具有最小完成时间和，且惩罚成本最小的调度方案，关于调度问题的解空间是一颗排列树。在排列空间树中，每个节点N都对应于一个已安排的作业集$M \subseteq \{1, 2, \ldots, n\}$。以该节点为根的子树中，叶节点的完成时间和可表示为：

$$f = \sum_{i \in M} F_i + \sum_{i \notin M} F_i$$

设$|M| = r$，且L是以节点E为根的子树中的叶节点，相应岸桥作业调度$\sum_{i \notin M} F_i \geq S_1$，其中$P_k$是第$k$个安排的岸桥。如果从节点$E$到叶节点$L$的路上，每一个作业$P_k$在泊位上完成处理后都能立即在岸桥上开始处理，即从$P_{r+1}$开始，泊位若没有空闲时间，则对于该叶节点$L$有：

$$\sum_{i \notin M} F_i = \sum_{k=r+1} \left[F_{pr} + (n-k+1) \cdot d_{pk} \right] = S_1$$

注：对于$(n-k+1) \cdot d_{pk}$来说,因为是完成时间和，所以，后续的$(n-k+1)$个作业完成时间和都得算上d_{pk}。如果不能做到上面这一点，则S_1只会增加，从而有：$\sum_{i \notin M} F_i \geq S_1$。

类似地，如果从节点E开始到节点L的路上，从作业p_{r+1}开始，岸桥没有空闲时间，则：

$$\sum_{i\notin M} F_i \geq \sum_{k=r+1}^{n}\left[\max(F_{p_r} + \min\sum_{i\notin M} d_i) + (n-k+1)d_{p_k}\right] = S_2$$

同理可知，S_2是$\sum_{i\notin M} F_i$的下界。由此得到在节点E处相应子树中叶节点完成时间和的下界是：$f \geq \sum_{i\in M} F_i + \max\{S_1, S_2\}$

如果选择P_k，在$k \geq r+1$时，d_{pk}为非减序排列。此时，S_1则取得极小值。同理如果选择P_k，则S_2也取得极小值。这可以作为分支限界法中的限界函数。

当完成对排列树内部结点的有序扩展时，要依次从活结点优先队列中取出具有最小值（完成时间和下界）的结点作为当前扩展结点，并加以扩展。

1）首先考虑E节点。$S = n$时，即当前的扩展结点E就是排列树中的叶结点。当该叶结点的完成时间和小于当前最优值时，需要更新当前最优值和相应的当前最优解。

2）再考虑E节点。$S < n$时，即依次产生当前扩展结点E的全部子结点。对于当前扩展结点的每一个子结点，计算出其相应的完成时间和的下界。当下界小于当前最优值时，将该子结点插入到活结点优先队列中；而当下界大于等于当前最优值时，可将该结点舍去。

为了能更方便的求解得到与最优值相应的最优解，在算法中的每个结点处需设置指向其父结点的指针，并设置左、右子标志。通过存储的相应子集树中从活结点到根结点的路径，可以在找到最优值后，根据子节点回溯到根节点，直到找到最优解为止。

§5.4 本章小结

本章针对鲁棒优化的特点，以及前文中的问题描述与模型求解的需要，设计分支定界算法来求解该问题的最优解。文中详细介绍了分支定界法的原理以及整个搜索过程。通过不断的搜索来寻求符合模型实际的最优值，得到下文中的数据结果。

第六章 算例分析

§6.1 不考虑岸桥干扰时的算例分析

文中考虑的码头系统为：定长的泊位（泊位每 10m 为一个单位）、岸桥数固定、所有岸桥的装卸效率一定。考虑的船舶有三类：150m、200m、250m。时间周期为 168 小时。待装卸的箱量为 1500 TEU，2000 TEU，2500 TEU。通过规模 $N=5$，$N=10$，$N=15$ 时，三个算例的鲁棒结果的实验数据进行对比评价。将模型的目标函数值与鲁棒后模型的到达时间、离港时间作为评价标准来进行评价。将上面的模型利用 CPLEX 12.6.1_WIN_X86-32 软件随机生成数据（如下表 6.1，6.2，6.3）直接求出最优解。并将求得的数据用带有数据标记的堆积折线图进行了描述与对比。

算例 1（$N=5$）即 5 艘船，原始输入数据见表 6.1。

表 6.1　5 艘船的原始数据

Table 6.1　Original data of 5 ships

船号	l	Δa	a	d	p	c_1	c_2	r^{min}	r^{max}	m
1	154	4	20	58	360	5	26	1	4	30
2	265	2	120	151	480	6	38	2	5	48
3	170	3	80	110	194	3	12	1	3	35
4	367	4	52	63	332	5	32	2	5	70
5	248	6	100	120	210	8	50	2	4	45

计算得到的不同鲁棒情况下的开始时间和完成时间分别见图 6.1 与图 6.2。

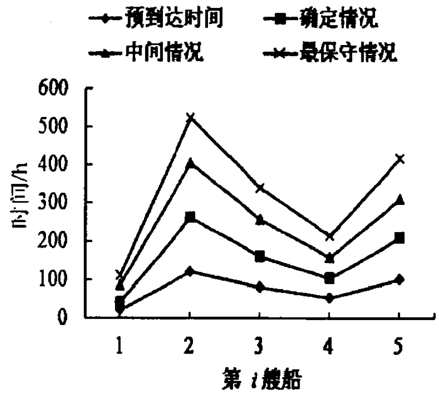

图 6.1 预到达时间与鲁棒情况下的开始时间图

Fig. 6.1 Estimated arrival time and robust cases start time

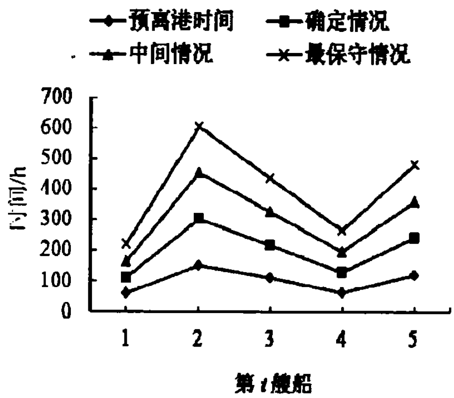

图6.2 预离港时间与鲁棒情况下的完成时间图

Fig. 6.2 Estimated departure time and robust cases completion time

以上算例结果显示，建立的鲁棒性泊位—岸桥分配模型是正确可行的。在确定性问题的基础上，引入参数Γ。通过调节Γ的值，得到不同变化下的鲁棒解，更切合实际。因此，模型具有实际意义。

从图 6.1 与图 6.2 中看出，鲁棒性越强，到达时间的变化越大，对完成时间的影响也就越明显。再由计算结果得到，取$\Gamma=0$，即确定性情况，得到的目标函数值最小为 276，迭代次数最多为 882 次。取$\Gamma=4.1$，即鲁棒中间情况的一种，得到的目标值为 282，迭代次数为 738 次。取$\Gamma=5$时，即最保守情况。得到的目标值最大为 300，但满足所有船舶的到达时间都发生变化，迭代用了 849 次。

算例 2（$N=10$）即 10 艘船，原始输入数据见表 6.2。

表6.2 10 艘船的原始数据

Table 6.2 Original data of 10 ships

船号	l	Δa	a	d	p	c_1	c_2	r^{min}	r^{max}	m
1	250	5	5	22	265	4	3	1	3	40
2	200	2	20	42	270	6	2	2	4	50
3	220	3	40	60	480	3	3	2	3	50
4	270	5	60	84	600	5	3	2	4	45
5	180	6	80	110	760	5	4	4	6	60
6	230	8	20	50	190	2	2	4	6	80
7	350	10	100	120	80	5	2	2	4	58
8	260	3	30	45	560	3	6	2	5	30
9	190	5	50	68	188	7	5	1	2	20
10	350	8	60	70	160	8	2	1	2	15

计算得到的不同鲁棒情况下的开始时间和完成时间分别见图 6.3 与图 6.4。

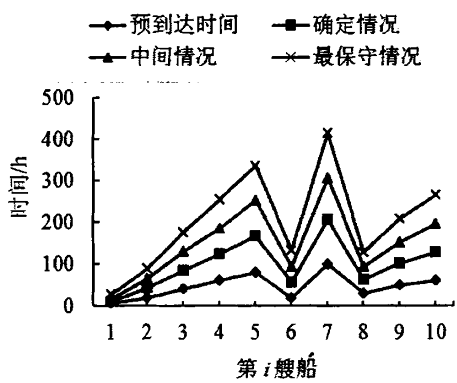

图 6.3 预到达时间与鲁棒情况下的开始时间

Fig. 6.3 Estimated arrival time and robust cases start time

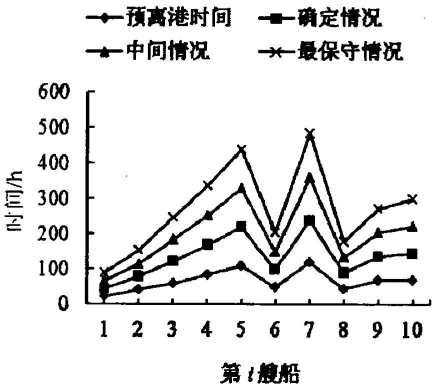

图6.4 预离港时间与鲁棒情况下的完成时间图

Fig. 6.4 Estimated departure time and robust cases completion time

从图 6.3 与图 6.4 中看出，鲁棒性越强，到达时间的变化越大，对完成时间的影响也就越明显。再由计算结果得到，取$\Gamma=0$，即确定性情况，得到的目标函数值最为 30，迭代次数最多为 9926 次。取$\Gamma=5.6$，即鲁棒中间情况一种，得到的目标值依旧为 30，迭代次数却为 2685 次。取$\Gamma=10$时，即最保守情况。得到的目标值最大，但满足所有船舶的到达时间都发生变化，迭代仅用了 155 次。

算例 3（$N=15$）即 15 艘船，原始输入数据见表 6.3。

表3 15 艘船的原始数据

Table 3 Original data of 15 ships

船号	l	Δa	a	d	p	c_1	c_2	$r^{\min}$	$r^{\max}$	m
1	250	4	12	28	265	5	12	2	4	40
2	200	2	20	52	170	6	20	2	4	30
3	220	3	45	60	482	3	15	3	3	32
4	273	4	65	84	91	5	14	2	4	45
5	185	6	80	115	650	5	4	2	3	25
6	230	8	20	50	760	2	6	3	5	35
7	355	3	108	140	88	5	8	2	4	65
8	260	3	40	55	320	3	12	3	5	41
9	190	5	59	88	600	7	10	3	4	26
10	350	8	60	95	250	8	8	2	5	64
11	150	7	120	130	180	12	2	3	5	18
12	280	8	80	98	100	17	5	3	4	48

13	180	4	77	100	260	8	15	2	5	17
14	220	6	35	50	670	5	3	2	6	32
15	260	9	130	160	540	5	76	2	5	43

计算得到的不同鲁棒情况下的开始时间和完成时间分别见图 6.5 与图 6.6。

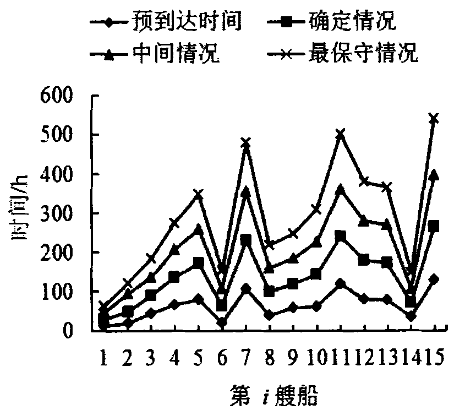

图 6.5 预到达时间与鲁棒情况下的开始时间图

Fig. 6.5 Estimated arrival time and robust cases start time

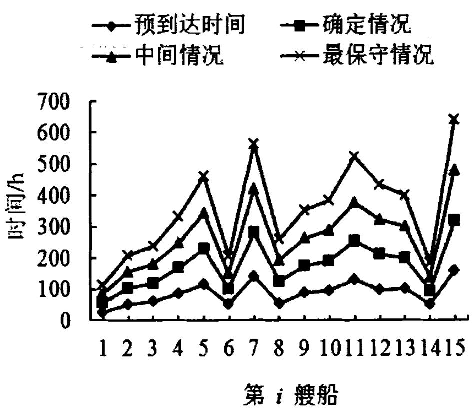

图6.6 预离港时间与鲁棒情况下的完成时间图

Fig. 6.6 Estimated departure time and robust cases completion time

从图 6.5 与图 6.6 中看出，鲁棒性越强，到达时间的变化越大，对完成时间的影响也就越明显。由计算结果得到，取$\Gamma=0$，即确定性情况，得到的目标函数值最为 301，迭代次数最多为 47464 次。取$\Gamma=12$，即鲁棒中间情况的一种，得到的目标值依旧为 301，迭代次数却为

34195 次。取 $\Gamma = 15$ 时，即最保守情况。得到的目标值最大为 321，但满足所有船舶的到达时间都发生变化，迭代仅用了 22344 次。

以上三个算例在 CPLEX 12.6.1_WIN_X86-32 软件中的计算结果显示：不论算例规模的大（小）在此模型之下得到的结论都相同，Γ 的取值越大，鲁棒性就越强；Γ 的取值越小，越接近理想值，得到的目标函数值也最小，迭代次数最少；Γ 取值越大，保守性越强，得到的目标函数值最大，但迭代次数却是最少的；. 中间情况具有稳定性。总体来看，某些外界因素的影响导致了船舶的到达时间发生变化，但实际并非所有的船舶都会发生变化，因此鲁棒的中间情况更符合实际情况。

§6.2 岸桥干扰时的算例分析

算例 1（$N = 5$）即 5 艘船，原始输入数据依旧为上表 6.1。

计算得到的不同鲁棒情况下的开始时间和完成时间分别见图 6.7 与图 6.8。

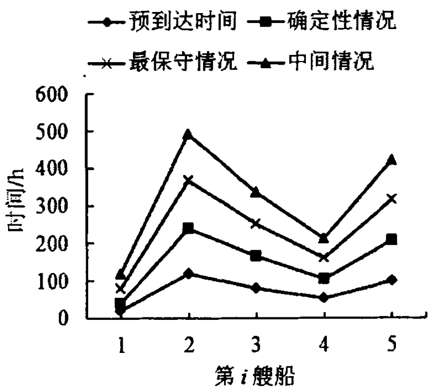

图 6.7 预到达时间与鲁棒情况下的开始时间图

Fig. 6.7 Estimated arrival time and robust cases start time

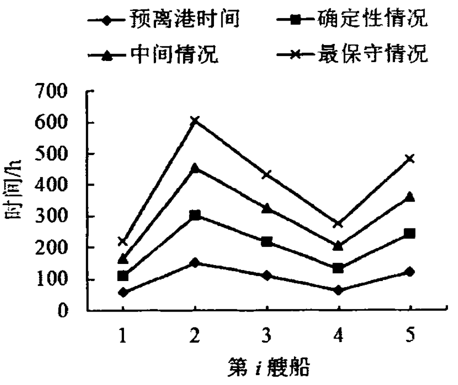

图6.8 预离港时间与鲁棒情况下的完成时间图

Fig. 6.8 Estimated departure time and robust cases completion time

以上算例结果显示，建立的鲁棒性泊位—岸桥分配模型是正确可行的。在确定性问题的基础上，引入参数Γ。通过调节Γ的值，得到不同变化下的鲁棒解，更切合实际。因此，模型具有实际意义。

从图 6.7 与图 6.8 中看出，鲁棒性越强，到达时间的变化越大，对完成时间的影响也就越明显。再由运行结果显示，取$\Gamma=0$，即确定性情况，得到的目标函数值最小为 384，迭代次数最少为 960 次。取$\Gamma=4.1$，即鲁棒中间情况的一种，得到的目标值为 390，迭代次数最多为 1072 次。取$\Gamma=5$时，即最保守情况。得到的目标值最大为 408，但满足所有船舶的到达时间都发生变化，迭代用了 1003 次。

算例 2（$N=10$）即 10 艘船，原始输入数据见上表 6.2。

计算得到的不同鲁棒情况下的开始时间和完成时间分别见图 6.9 与图 6.10。

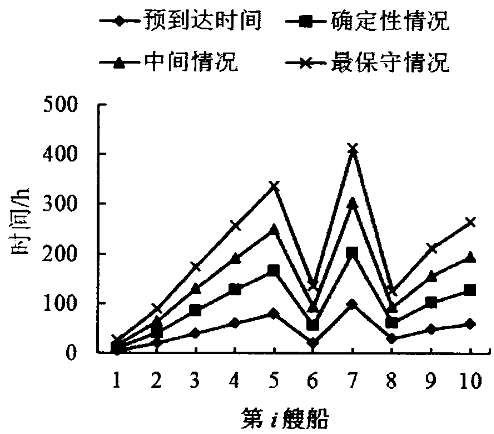

图 6.9 预到达时间与鲁棒情况下的开始时间图

Fig. 6.9 Estimated arrival time and robust cases start time

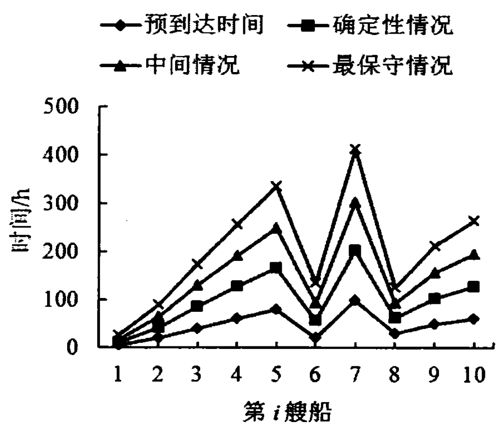

图6.10 预离港时间与鲁棒情况下的完成时间图

Fig. 6.10 Estimated departure time and robust cases completion time

从图 6.9 与图 6.10 中看出，鲁棒性越强，到达时间的变化越大，对完成时间的影响也就越明显。再由运行结果显示，取$\Gamma=0$，即确定性情况，得到的目标函数值最为 42，迭代次数最少为 2703 次。取$\Gamma=5.6$，即鲁棒中间情况的一种，得到的目标函数值依旧为 42，迭代次数却为 3335 次。取$\Gamma=10$时，即最保守情况。得到的目标函数值最大，且满足所有船舶的到达时间都发生变化的所有情况，迭代次数最多为 3941 次。

算例 3（$N=15$）即 15 艘船，原始输入数据见上表 6.3。

计算得到的不同鲁棒情况下的开始时间和完成时间分别见图 6.11 与图 6.12。

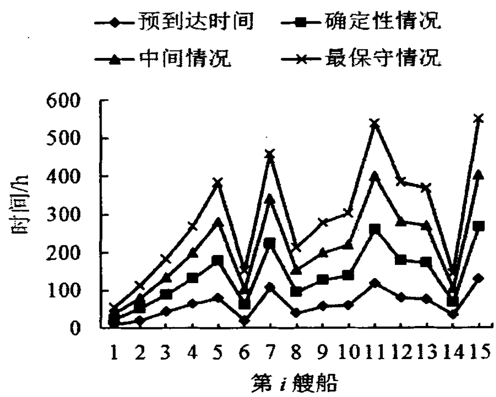

图 6.11 预到达时间与鲁棒情况下的开始时间图

Fig. 6.11 Estimated arrival time and robust cases start time

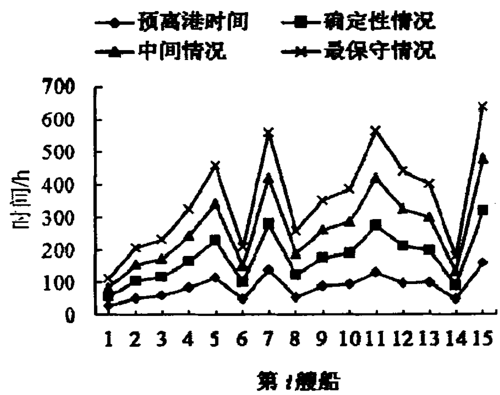

图6.12 预离港时间与鲁棒情况下的完成时间图

Fig. 6.12 Estimated departure time and robust cases completion time

从图 6.11 与图 6.12 中看出，鲁棒性越强，到达时间的变化越大，对完成时间的影响也就越明显。再由运行结果显示，取$\Gamma=0$，即确定性情况，得到的目标函数值最为 393，迭代次数最多为 59522 次。取$\Gamma=12$，即鲁棒中间情况一种，得到的目标值依旧为 393，迭代次数却为 52144 次。取$\Gamma=15$时，即最保守情况。得到的目标值最大为 444，但满足所有船舶的到达时间都发生变化的可能，迭代仅用了 22189 次。

以上三个算例在 CPLEX 12.6.1_WIN_X86-32 软件中的计算结果显示：不论算例规模的大（小），在此模型之下得到的结论都相同，Γ的取值越大，鲁棒性就越强，得到的目标函数值就越大；Γ的取值越小，越接近理想值，得到的目标函数值就越小；Γ取中间值时，具有较

强的稳定性。总体来看，某些外界因素的影响导致了船舶的到达时间发生变化，但实际并非所有的船舶都会发生变化，因此鲁棒的中间情况更符合实际情况。

§6.3 本章小结

理想情况下，船舶按既定计划进行装卸作业。然而现实中，诸多不确定因素的改变将导致既定计划的频繁改变。为了便于调度，本章根据实际结果对岸桥干扰或者不干扰时的泊位、岸桥进行整合调度，将船的到达时间作为不确因素，进行分情况讨论。得到不同规模下的鲁棒结果。数据实验表明，对确定性问题的鲁棒更符合实际生活，具有重要的研究意义。

第七章 结论与展望

§7.1 结论

泊位的分配、岸桥的调度是集装箱码头操作员运作的关键。在分析了泊位、岸桥以及两者之将的联合调度问题的研究现状后，针对目前仍存在的一些问题，对集装箱码头泊位—岸桥联合调度的鲁棒优化问题进行了研究。目前的泊位—岸桥的联合调度在确定性情况下研究的居多，往往忽略了诸多数据不确定性的影响。虽然只考虑确定性情况来处理问题比较简单，但由此得到的调度计划有些不符合实际情况。一旦发生突发情况，决策者必须对既定计划做合理的整顿。因此，在制定泊位分配与岸桥调度的时候，利用鲁棒优化方法来求解数据不确定性问题有利于决策者节省时间、降低经营成本。这正是本文的创新之处。

现实中，外界不确定因素的影响导致泊位、岸桥的实际调度值异于理想值。此时，可能就会违反原有的确定性模型中的一些约束，使得既定的确定性情况下的调度方案不再最优甚至变得不可行。这意味着既定的调度计划需要频繁改变，找到一种使得优化解免受数据不确定性因素影响的优化方法势在必行。鲁棒优化是近年来求解不确定性问题的一种新方法，其无需知道决策变量的具体分布。鲁棒的目的是通过引入随机参数，不断调节参数取值以求得满足决策变量均发生变化时的最优解，且最保守情况下的目标函数值也最优。因此，采用鲁棒优化方法求解不确定性问题的最优方案具有相当的优势。本文以船舶总惩罚成本为目标，将船舶的到达时间作为不确定因素，建立泊位—岸桥联合调度的鲁棒优化模型。采用分支定界算法，在 CPLEX 12.6.1_WIN_X86-32 软件中求解了不同程度鲁棒下问题的目标函数值、迭代时间。实验表明，到达时间的不确定性鲁棒程度越强，船舶的总延迟时间就越大。分析发现船舶的总惩罚成本随鲁棒程度的增强而增加，迭代时间则随鲁棒程度的增强而减少。决策者若选择选择鲁棒下的调度方案，既能应对突发情况的改变，保证调度计划稳定性；又可以减少资源的浪费，提高码头系统整体的作业效率，高效又节能。因此，具有一定的研究价值。

§7.2 展望

集装箱码头是协调循环的作业调度系统。泊位与岸桥的协调调度只是其中的一部分。本文在模型优化方面有一定进展，但是船舶的在港时间还受堆场空间分布、集卡以及场桥的调

度等其它作业环节的影响。因此，今后考虑除到达时间的不确定性之外的其他不确定因素对泊位—岸桥的影响，以及泊位—岸桥同其他环节协调调度等的研究，都是未来的研究方向。另外，对于泊位—岸桥协调调度系统中其他的突发情况进行分析，提出适合的动态调度、鲁棒优化、随机规划等方法，也将是今后的一个研究方向。

参考文献

[1] Edmond E D, Maggs R P. How useful are queue models in Port investment decisions for container berths [J]. Journal of the Operation Research Society. 1978, 19(8):741-750.

[2] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. The dynamic berth allocation problem for a container port[J]. Transportation Research Part B. 2001, 35(4):401-417.

[3] Nishimura E, Imai A, Papadimitriou S. Berths allocation planning in the public berth system by genetic algorithms[J]. European Journal of Operational Research. 2001, 131(2):282-292.

[4] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Corrigendum to “The dynamic berth allocation problem for a container port”[J]. Transportation Research Part B. 2005, 39:197.

[5] Guan Y, Xiao W Q, Cheung R K, et al. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis[J]. Operations Research Letters. 2002, 30(5):343-350.

[6] Kap Hwan Kim, Kyung Chan Moon. Berth scheduling by simulated annealing[J]. Transportation Research Part B. 2003, 57: 541-560.

[7] Kim K H, Moon K C. Berth scheduling by simulated annealing[J]. Transportation Research Part B. 2003, 37(6):541-560.

[8] Wang F, Lim A. A stochastic beam search for the berth allocation problem[J]. Decision Support Systems. 2007, 42 (4):2186-2196.

[9] Hansen P, Oguz C, Mladenovic N. Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation[J]. European Journal of Operational Research. 2008, 191(3):636-649.

[10] Zhen L, Lee L H, Chew E, et al. A decision model for berth allocation under uncertainty[J]. European Journal of Operational Research. 2011, 212, 54-68.

[11] Bierwirth C, Meisel F. A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints[J]. Journal of Scheduling. 2009, 1007(10):009-0105.

[12] Zhu Y, Lim A. Crane scheduling with non-crossing constraint[J]. Journal of the Operational Research Society. 2006, 57 (12):1464-1471.

[13] Lee D H, Wang H Q, Miao L. An approximation algorithm for quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals[J]. Transportation Research Part E. 2007,

8(6):10-15.

[14] Lee D H, Wang, H Q, Miao L. Quay crane scheduling with noninterference constraints in port container terminals. Transportation Research Part E. 2008, 44(1):124-135.

[15] Park Y M, Kim K H. A scheduling method for berth and quay cranes[J]. OR Spectrum. 2003, 25(1):1-23.

[16] 蔡芸，孙国正. 同时求解泊位分配及岸桥调度问题的仿真优化方法[J]. 可持续发展的中国交通. 2003, 11:22-26.

[17] Imai A, Chen H C. Nishimura E et al. The simulaltaneous berth and quay crane allocation problem[J]. Transportation Research Part E. 2008, 44 (5):900-920.

[18] Lu Z, Han X L, Xi L F, Simultaneous berth and quay crane allocation problem in container terminal[J]. Advanced Science Letters. 2011, Vol. 4, 1-6.

[19] Chen J H, Lee D H, Cao J X. A combinatorial benders' cuts algorithm for the quayside operation problem at container terminals[J]. Transportation Research Part E. 2011, 48(1): 266-275.

[20] Liang C J, Huang Y F, Yang Y. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. Computers and Industrial Engineering. 2008, 56(3):1021-1028.

[21] Meisel F, Bierwirth C. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem[J]. Transportation Research Part E. 2009, 45(1):196-209.

[22] Lee D H, Wang H Q. Integrated discrete berth allocation and quay crane scheduling in port container terminals[J]. Engineering optimization. 2010, 42(8):747-761.

[23] Han X L, Lu Z Q, Xi L F. A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time[J]. European Journal of Operational Research. 2010, 207(3):1327-1340.

[24] 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(2):117-121.

[25] Zhang C R, Zhang L, Zhang Z H, et al. The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique[J]. Computers & Industrial Engineering. 2010, 58(1):40-50.

[26] Chang D F, Jiang Z H, Yan W, et al. Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. Transportation Research Part E. 2010, 46(6):975-990.

[27] 周鹏飞，康海贵. 面向随机环境的集装箱码头泊位—岸桥分配方法[J]. 系统工程理论与

实践. 2008(1):161-169.

[28] 李娜. 集装箱码头连续泊位与岸桥调度联合优化研究[D]. 大连海事大学, 2011.

[29] Xu Y, Chen Q H, Quan X W. Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time[J]. Annals of Operations Research. 2012, 191(1):123-140.

[30] 桂小娅. 不确定性条件下集装箱码头泊位与岸桥集成调度计划建模与优化[D]. 上海交通大学. 2013.

[31] Soyter A L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming[J]. Operations Research. 1973, 21(3):1154-1157.

[32] Ben-tal A and A, Nemirovski, Robust solutions of Linear Programming programs contaminated with uncertain data[J]. Mathematical Programming. 2000, 88(3):411-424.

[33] Bertsimas D and M Sim. The price of robustness[J]. Operations Research. 2004, 52(1):35-53.

[34] 王燕来, 陈宝林, 马仲蕃等. 运筹学与最优化理论卷[M]. 北京: 清华大学出版社. 1998, 201-208.

[35] 李胜华. 分支与定界算法的实现研究[J]. 内江师范学院学报. 2003,18(2):21-23.

致 谢

岁月匆匆如流水，研究生三年的生活马上就要结束了。不久我们将走出学校大门，此刻我多么的留恋这三年的美好时光。这里的点滴都是我们人生路上的点缀，这个季节既是我们校园求学路的结束，又是一次新征程的开始。

毕业论文的完成是一个漫长而艰巨的任务，这中间不说经历过多少困难，却也是几度的焦虑与烦躁。从最开始研究方向的确定、文献的综述撰写、模型的建立、编程软件的学习，再到后来论文的完成，直到终极论文的定稿，都与您的帮助息息相关。这里要特别感谢我的学业以及人生导师一曹瑾鑫教授。您是我最尊敬的老师，您治学严谨、学识渊博、作风正气，总是诲人不倦的指导我们的学习与生活。您的言传身教，引领我走过了三年的研究生长廊，即将步入社会，您的教诲我会时刻铭记于心。在此，向您表示由衷的感谢，谢谢您，曹老师!

感谢数学科学学院的所有老师，你们都是极具责任心的好老师；感谢帮助过我的同门师兄、师姐、师弟、师妹们，你们陪我度过了漫长的春夏，每当我遇到问题，你们总第一时间给予我帮助，一起跟我商量解决办法；在此，感谢我所有的好朋友们。一个人的成长离不开他人的帮助与支持，我很庆幸能在最美好的年代遇到你们，这几年中我收获颇多。三年的内蒙情谊，无限的丰富、精彩，在你们的精心帮助下，我顺利的完成了毕业论文。遇上你们是我人生中最珍贵的财富，感谢你们在我悲观的时候不离不弃，在我高兴地时候一起分享；同样感谢我的父母，不论你们身在何处，愿你们永远年轻、幸福!

最后，感谢百忙中抽空审阅本论文的专家学者们，向你们表示诚挚的谢意!

十年树木，百年树人。我坚信，只要一步一步去努力，未来就掌握在自己的手中。风正劲足，正当扬帆破浪。任重道远，更需策马加鞭。挥别过往，迈步向前。长路漫漫，定不辜负所有关心过我的人。

攻读硕士学位期间发表学术论文

[1] 刘慧莲, 曹瑾鑫. 不确定性集装箱码头泊位与岸桥分配问题[J]. 内蒙古大学学报. (已接受).