

文章编号:1671-1637(2019)01-0136-11

集装箱码头集成调度研究综述

常祎妹, 朱晓宁, 王 力

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘 要:按照不同的研究区域,总结了集成调度在码头前沿、码头堆场以及码头前沿和堆场间等方面的国内外文献,并提出了未来的研究方向。研究结果表明:多数文献研究的是传统集装箱码头的集成调度问题,并取得了较多成果,也有少数文献研究了自动化码头的集成调度问题,随着科技的发展和自动化码头的增多,在今后的研究中,应结合自动化码头的特点,研究自动化码头内的设备集成调度问题;多数文献都是在静态或确定情况下研究集装箱码头的集成调度问题,只有极少数文献考虑了码头生产调度过程的动态或不确定性,因此,随着研究的逐步深入,动态或不确定因素下的集成调度问题将成为未来的研究重点;多数文献均建立了以时间、成本最小或二者相结合的目标函数,虽然也有助于提高码头的生产效率,但是依旧存在一定的局限性,随着能源问题的日益严重,在未来的研究中,应建立均衡能耗和其他优化目标的多目标模型;多数文献中设计了启发式算法,并获得了较好的优化解,为了使求解方法更加多元化,应将算法计算与仿真验算相结合;随着多式联运的兴起,应在考虑铁路作业区对整个集装箱码头影响的基础上研究铁路作业区与码头间的集成调度问题。

关键词:水路运输;集成调度;模型构建;算法设计;集装箱码头

中图分类号:691.31 **文献标志码:**A

Review on integrated scheduling of container terminals

CHANG Yi-mei, ZHU Xiao-ning, WANG Li

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to different research areas, the domestic and foreign literatures on the integrated scheduling in the quayside area, container yard and between quayside area and container yard were summarized. The future research direction was proposed. Analysis result shows that the most literatures study the integrated scheduling problem at the traditional container terminals, and make rich achievements. Only a few literatures focus on the integrated scheduling problem at the automatic container terminals. With the development of technology and the increase at the automatic container terminals, the integrated scheduling problem at the automatic container terminals should be studied by combining the characteristics of automatic container terminals in the future. Most literatures concentrate on the integrated scheduling problems of container terminals under the static or certain conditions. Only a few literatures focus on the integrated scheduling problem of container terminals under the dynamic or uncertain conditions. Therefore, with the research deepen progressively, the integrated scheduling problem under the dynamic or uncertain factors will be the focus of future research. The objective functions are developed based

收稿日期:2018-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(71390332);民航科技项目(201501)

作者简介:常祎妹(1991-),女,辽宁沈阳人,北京交通大学工学博士研究生,从事集装箱运输与多式联运研究。

导师简介:朱晓宁(1965-),男,辽宁铁岭人,北京交通大学教授,工学博士。

on the time, cost or the combination of time and cost in most literatures. Although these can enhance the efficiency of container terminals, but still have some limitations. As the energy problems get increasingly serious, a multi-objective model for establishing the balanced energy consumption and other optimization objectives should be put forward. Most literatures propose the heuristic algorithms to solve the problem and get better optimal solutions. To increase the diversification of solution methods, a solution strategy combining algorithm computation with simulation checking should be proposed. With the rapid development of intermodal transportation, the influence of railway operation area on the container terminal should be considered, and the integrated scheduling between the container terminal and railway operation area should be studied. 4 tabs, 53 refs.

Key words: waterway transportation; integrated scheduling; modeling; algorithm design; container terminal

Author resumes: CHANG Yi-mei(1991-), female, doctoral student, 732654146@qq.com; ZHU Xiao-ning(1965-), male, professor, PhD, xnzhu@bjtu.edu.cn.

0 引言

随着经济全球化与国际贸易的发展,集装箱运输已成为货物运输的主要方式。集装箱码头作为集装箱运输的缓冲地,在整个集装箱运输过程中占有重要地位,同时,集装箱码头作业也是决定整个集装箱运输过程快慢的重要环节,因而如何高效地管理集装箱码头作业成为码头管理运营者的首要任务。通过集装箱码头各个作业环节的相互配合,不仅可以减少船舶的在港时间,缩短集装箱中转周期,还可提升集装箱码头的竞争力。

集装箱码头的生产是指在码头使用装卸搬运堆存机械,遵循一定的操作工艺,以集装箱装卸堆存为主要业务的生产活动。故集装箱码头的主要作业包括泊位分配、岸桥调度、岸桥分配、集卡调度、堆场分配以及场吊调度等,因此,集装箱码头的生产调度主要是安排到达港口的船舶在某个时间进行靠泊装卸作业以及在码头内部装卸、堆存、运输进出口集装箱,并合理分配与使用码头的设施设备。

集装箱码头生产调度系统是一个充分合理利用自身泊位资源、码头前沿装卸设备、水平搬运设备以及堆场堆存资源,在相关码头运营、组织和管理的计算机管理软件辅助下,通过完成进港船舶靠泊作业、集装箱装卸作业、集装箱水平运输作业、堆场堆存作业以及码头大门进出控制作业,从而实现船舶和集装箱进出码头的综合作业系统。在这个综合作业系统中,码头内的各个作业相互关联、相互影响、相互制约,从而共同完成集装箱码头船舶和集装箱的生产作业任务,单独考虑某一个作业环节的优化,忽略其他作业环节,则无法实现集装箱码头生产作业的

整体优化,因此,为了提高整个集装箱码头生产作业效率,必须综合考虑作业系统内的每个环节、每个作业,并对它们进行集成优化。故越来越多的学者不再局限于单一问题的研究,而是研究这些作业间的集成调度问题。

集装箱码头集成调度问题可描述为:在确定集装箱码头设施设备的基础上,以提高集装箱码头整体作业效率为目标,考虑生产调度中的实际约束条件,同时对集装箱生产调度过程中的多个作业环节进行优化的问题。

Vis 等详细评述了集装箱码头前沿作业、运输作业、堆场作业等问题^[1-6],但未能对集装箱码头集成调度问题进行总结。鉴于此,本文通过整理与分析国内外典型集装箱码头集成调度问题相关文献,提出了未来的研究方向和趋势;根据研究区域,主要对集成调度问题在码头前沿、码头堆场以及码头前沿与码头堆场间的文献进行了整理。

1 集成调度问题在码头前沿的研究

码头前沿是船舶进行靠泊和装卸作业的主要场所,因而码头前沿的作业效率会对后续作业的效率产生较大影响。在码头前沿最为重要的2种资源为泊位和岸桥,这2种资源均是集装箱的稀缺资源,因而合理有效地利用泊位和岸桥,不仅可以提高集装箱的作业效率,也可以提升整个集装箱码头的运营管理水平,因此,在码头前沿主要涉及的问题包括泊位分配、岸桥分配以及岸桥调度问题。

船舶到达港口后,首先要进行泊位分配之后才能进行后续作业,因而泊位分配作为港口集装箱作业的起始作业对港口作业和运营效率影响巨大。泊

位分配的结果也将直接影响岸桥的调度和集卡的行驶距离,间接影响堆场资源的利用。泊位分配完成之后,根据船舶上集装箱的装卸情况,指定一定数量的岸桥对集装箱进行装卸作业。之后进行岸桥调度,岸桥调度是集装箱码头作业系统的关键环节,是影响集装箱码头效率的主要因素,也是决定集装箱码头吞吐能力的主要因素。泊位分配、岸桥分配以及岸桥调度之间相互影响,因此,越来越多的人对这3个问题间的集成调度问题进行研究。在总结的所有文献中,码头前沿的集成调度问题主要涉及泊位和岸桥间的集成调度问题^[7-18]以及岸桥分配和调度的集成调度问题^[19-23]。

对于泊位和岸桥间的集成调度问题:Imai 等研究的目的是为了缩短整个过程的总服务时间,并利用遗传算法对问题进行求解,但未考虑岸桥数与装卸时间之间的关系^[7];Meisel 等以船舶总服务费用最小为目标,建立了一个优化模型,考虑了减少分配给船舶的岸桥边际生产效率以及在船舶未停泊到指定位置时增加装卸时间等约束,并设计了4种算法求解模型^[8];Liang 等建立了泊位和岸桥分配集成调度模型,并设计了混合进化算法,但忽略了岸桥的走行时间^[9];Chang 等建立了一个多目标动态分配模型且考虑了泊位长度,并设计了混合并行遗传算法对模型进行求解^[10];Zhang 等建立了一个混合整数规划模型,目标是为了最大限度地减少集装箱装卸成本的加权和,考虑了岸桥的覆盖范围和岸桥在装卸过程中的有限调整,并设计了子梯度优化算法^[11];曾庆成等运用干扰管理方法,从码头作业成本、船舶等待成本以及计划偏离度3个方面度量系统扰动,建立了泊位分配-装卸桥调度干扰管理模型,提出了求解干扰管理模型的仿真优化模型,设计了基于局部重调度与禁忌搜索算法的仿真优化算法^[12];Raa 等建立了一个混合整数规划模型,考虑船舶的优先权、优先靠泊位置和装卸时间等约束条件,并设计了混合启发式求解程序^[13];Yang 等为了减少到达船舶的平均服务时间和每艘船的岸桥移位操作的平均数,考虑码头的长度,建立了一个模型,并设计了基于嵌套循环的进化算法^[14];Elwany 等考虑了每艘船舶的水深,以减少服务质量成本和运营成本为目标建立模型,并设计了模拟退火算法对问题进行求解^[15],但未考虑岸桥走行时间、船舶优先权等约束条件;桂小娅等以最小化船舶总在港时间为目标建立了连续型泊位和岸桥集成调度的数学模型,并采用拆分决策对象的双层循环迭代算法对

模型进行求解^[16];Türkoğullari 等首先建立了一个关于泊位和岸桥分配(数量)的二进制整数线性规划模型,目标函数为减少总费用,并设计了后处理算法进行求解,之后在原模型的基础上增加了岸桥分配(具体)问题,并设计了割平面算法对新问题进行求解,但也未考虑岸桥走行时间^[17];Han 等考虑了船舶到达时间和集装箱装卸时间的不确定性(泊位离散、船舶动态到达并有不同的服务优先级),建立了一个非线性混合整数规划模型,目标是为了降低期望值与周期范围内所有船舶总服务时间的标准差和延误时间加权值之和,为了求解问题,提出了一个基于仿真的遗传算法^[18]。

对于岸桥分配与岸桥调度的集成调度问题:Tavakkoli-Moghaddam 等建立了一个以最小化装卸船舶总费用为目标的混合整数规划模型,并考虑了船舶和港口运营商之间的协议到达和离开时间以及船舶早到或晚离开的惩罚,为了求解模型,设计了遗传算法^[19];Fu 等建立了一个数学模型,使得工作完成标志最大化(即工作完成总时间最小化),并考虑岸桥间的相互干扰,为了求解模型,设计了拉格朗日松弛算法和遗传算法^[20-21];Diabat 等建立了一个混合整数规划模型,目标是为了减少船舶的装卸完成总时间,考虑了岸桥的位置状态,并设计了遗传算法对问题进行求解^[22];Theodorou 等通过将岸桥分配问题和岸桥调度问题转化成岸桥到贝位的问题,从而同时研究这2个问题,目的是为了缩短整个过程的总完成时间,并设计了拉格朗日松弛算法求解问题^[23]。

针对集成调度问题在码头前沿的研究内容、研究目标、模型类型、算法类型以及试验规模进行了整理,见表1,可知集成调度问题在码头前沿的研究具有如下特点:多数文献研究的都是确定性的集成调度问题,即在岸桥作业的过程中数量和作业效率不变的情况下研究泊位和岸桥或岸桥分配与调度间的集成调度问题;多数文献都是研究泊位分配问题、岸桥调度问题以及岸桥分配问题,且以泊位与岸桥的集成调度问题居多;文献的研究目标更加多元化,不仅考虑了缩短作业完成时间这一目标,还考虑了减少作业成本以及作业设备的能耗等方面的目标;由于研究的问题是 NP-hard 问题,因此,文献中多采用智能算法或启发式算法求解提出的模型,并可以求解大规模算例。

根据上述分析,本文认为集成调度问题在码头前沿的未来研究方向有:既考虑作业设备的相关约束条件,如岸桥走行时间、岸桥间的相互干扰以及非

表 1 集成调度在码头前沿的研究汇总
Tab. 1 Research summary on integrated scheduling in quayside

作者(年份)	研究内容	研究目标	模型类型	算法类型	试验规模
Imai 等(2008)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少总服务时间	集成调度模型	遗传算法	小规模
Liang 等(2009)	泊位和岸桥调度的集成调度问题	减少每艘船的装卸时间、等待时间以及延误时间	集成调度模型	混合进化算法	大规模(684 个集装箱)
Tavakkoli-Moghaddam 等(2009)	岸桥分配和岸桥调度的集成调度问题	减少装卸船舶总费用	混合整数规划模型	遗传算法	小规模(16 个工作任务)
Meisel 等(2009)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少船舶的总服务费用	优化模型	结构启发式算法、局部优化算法、2 个启发式算法	大规模(40 艘船)
Han 等(2010)	泊位调度和岸桥调度的集成调度问题	减少期望值与船舶的总服务时间的标准差和延误时间加权值之和	非线性混合整数规划模型	基于仿真的遗传算法	未提及
Chang 等(2010)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少实际和最好的停泊位置水平之间的总偏差、船舶停泊和离开时间延误的总惩罚费用以及岸桥的总能耗	动态分配模型	混合并行遗传算法	大规模(4 490 个集装箱)
Zhang 等(2010)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少集装箱装卸成本的加权和	混合整数规划模型	子梯度优化算法	大规模(3 052 个集装箱)
曾庆成等(2010)	泊位和岸桥调度的集成调度问题	减少船舶未停靠在最佳位置而引起的额外成本以及装卸作业成本	干扰管理模型	仿真优化算法	大规模(实际港口数据)
Raa 等(2011)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少船舶装卸时间、船舶停泊位置以及分配给船舶的岸桥数变化的惩罚	混合整数规划模型	混合启发式求解程序	大规模(实际港口数据)
Elwany 等(2013)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少服务质量成本和运营成本	集成调度模型	模拟退火算法	大规模(40 艘船)
Fu 等(2014)	岸桥分配和岸桥调度的集成调度问题	减少总完成时间	集成调度模型	遗传算法、拉格朗日松弛算法	大规模(100 艘船)
Türkogullari 等(2014)	泊位和岸桥分配的集成调度问题	减少总费用	二进制整数线性规划模型	后处理算法	大规模(60 艘船)
Diabat 等(2014)	岸桥分配和岸桥调度的集成调度问题	减少船舶卸载过程的总完成时间	混合整数规划模型	遗传算法	大规模(7 175 个集装箱)
Theodorou 等(2014)	岸桥分配和岸桥调度的集成调度问题	减少总完成时间		拉格朗日松弛算法	大规模(6 450 个集装箱)

恒定的岸桥生产效率等,又要考虑船舶方面的约束条件,如不同船舶的优先权、船舶停泊位置以及码头水深等,从而使得问题的研究更加符合实际情况;研究不确定性下的集成调度问题,考虑在码头前沿作业过程中可能出现的状况,如设备失灵、设备损坏等;将泊位分配、岸桥调度与岸桥分配 3 个问题同时考虑,研究这 3 个问题间的集成调度问题,从而有效地提高码头前沿的作业效率。

2 集成调度问题在码头堆场的研究

集装箱作业在码头堆场主要涉及的问题有场吊

调度问题、堆场分配问题以及集卡调度问题。集成调度问题在码头堆场主要的研究方向是集卡调度与堆场分配的集成调度问题。Cao 等建立了一个减少卸载过程总时间的整数规划模型,并提出了遗传算法与贪婪算法相结合的启发式算法^[24];Lee 等建立了关于集卡调度与堆场分配集成调度的混合整数规划模型,目标是为了减少集装箱从起点到终点移动的总延误时间与集卡总走行时间的加权和,并设计了混合插入算法对问题进行求解^[25],还考虑不同类型进口集装箱、场区内不同堆存时间,并以减少卸载过程中总完成时间为目标,为了解模型,设计了遗

传算法和贪婪启发式算法^[26];Luo 等在考虑装卸过程的情况下,建立了一个以缩小船舶停泊时间的混合整数规划模型,并设计了遗传算法进行模型求解^[27],之后,他们将堆场分配问题细化,确定了集装箱在堆场中的具体位置,建立了一个混合整数规划模型,目的是为了减少船舶的停泊时间,并设计了遗传算法来求解问题^[28],但只考虑了卸载过程,忽略了集卡堵塞问题、场吊和岸桥间的相互干扰以及放箱和取箱时间;Niu 等考虑了集卡准备时间,应用粒子群算法和细菌菌落优化算法对问题进行求解^[29];鲁渤等针对自动化集装箱码头水平搬运作业和堆场作业,提出一种集成调度优化方法,以最小化最大完工时间为目标,同时考虑船舶装卸作业,建立了自动升降车调度与堆场位置分配集成优化模型,并设计了基于遗传算法的启发式算法^[30]。

关于场吊调度与集卡调度的集成调度问题:Bish 建立了一个关于场吊调度与集卡调度的集成调度的多岸桥约束模型,考虑了不同类型的集装箱以及装卸 2 个过程,并设计了启发式算法求解模型^[31];Cao 等提出了一个关于场吊调度与集卡调度

的集成调度的混合整数规划模型,目标是为了减少作业的总完成时间,为了求解模型,设计了 2 种有效解决方案^[32],但仅考虑了装载过程,未考虑场吊间干扰、集卡堵塞、集装箱到期日期等约束;Kozan 等提出了一个关于堆场操作的模型,既决定堆场的分配策略,又决定场吊的装卸序列,为求解该模型,设计了一种禁忌搜索与遗传算法的混合算法^[33]。

本文针对集成调度问题在码头堆场的研究内容、研究目标、模型类型、算法类型、试验规模以及是否同时考虑装载和卸载过程进行了整理,见表 2,可知集成调度问题在码头堆场的研究具有如下特点:多数研究均围绕堆场分配与集卡调度间的集成调度来开展,很多研究仅针对单一过程进行,即只研究卸载或装载过程中的集成调度;与集成调度问题在码头前沿的研究一样,多数研究都是在确定情况下开展的,即假设作业设备的作业时间固定不变,不考虑设备的损耗等因素;多数文献的目标都是缩短作业时间,如减少作业完成总时间、减少延误时间等,且多数文献中较为全面地考虑了与作业时间相关的约束条件。

表 2 集成调度在码头堆场的研究汇总

Tab. 2 Research summary on integrated scheduling in container yard

作者(年份)	研究内容	研究目标	模型类型	算法类型	试验规模	是否同时考虑装载和卸载过程
Kozan 等 (2006)	堆场分配和场吊调度的集成调度问题	减少船舶的停泊时间	集成调度模型	禁忌搜索与遗传算法的混合算法	大规模(500 个集装箱)	未涉及
Cao 等 (2008)	集卡调度与堆场分配的集成调度问题	减少卸载过程总完成时间	整数规划模型	遗传算法与贪婪算法的混合算法	大规模(100 个集装箱)	否
Lee 等 (2009)	集卡调度与堆场分配的集成调度问题	减少集装箱从起点到终点移动中的总延误时间及集卡总走行时间的加权和	整数规划模型	混合插入算法,遗传算法和贪婪启发式算法	大规模(100 个集装箱)	否
Cao 等 (2010)	场吊调度与集卡调度的集成调度问题	减少总完成时间	集成调度模型	通用 Benders 切割方法和组合 Benders 切割方法	大规模(500 个工作任务)	否
Luo 等 (2015)	集卡调度与堆场分配的集成调度问题	减少船舶的停泊时间	混合整数规划模型	遗传算法	大规模(100 个集装箱)	是
Luo 等 (2016)	集卡调度与堆场位置分配的集成调度问题	减少船舶的停泊时间	混合整数规划模型	遗传算法	大规模(200 个集装箱)	否
Niu 等 (2016)	集卡调度与堆场分配的集成问题	减少集装箱的总延误时间	集成调度模型	粒子群算法和细菌菌落优化算法	大规模(100 个集装箱)	未提及
鲁渤等 (2017)	自动升降车与堆场位置分配的集成调度问题	减少作业的总完成时间	集成优化模型	遗传算法	大规模(200 个集装箱)	是

根据上述分析,本文认为集成调度问题在码头堆场未来的研究方向有:为了使研究的问题更加符

合实际,需要考虑场吊的提箱和放箱时间及其走行时间等约束条件,并考虑场吊间相互干扰以及集装

箱在堆场中可能存在的倒箱问题、集卡在走行路径上的堵塞问题、集装箱的到期日期等实际约束条件;研究不确定条件下码头堆场的集成调度问题,考虑作业过程中可能存在的干扰,如设备故障、设备数发生变化等影响因素;可以将成本、能耗以及与环境有关的内容加入到目标中,形成多目标优化问题,从而更好地提升整个集装箱码头的作业效率与竞争力。

3 集成调度问题在码头前沿与码头堆场间的研究

这部分主要从整体的角度考虑集装箱码头内各环节间的相互影响,从而在调度过程中使各个设备之间可以高效配合。这部分文献可以分为两大类:一类为 2 种设备间的集成调度问题;另一类为 3 种设备间的集成调度问题。

3.1 两种设备间的集成调度

2 种设备间的集成调度主要针对岸桥与集卡间的集成调度问题。Tang 等建立了一个关于岸桥和集卡的集成调度模型,考虑了集装箱间的优先关系、岸桥间不能跨越、安全距离以及设备间的等待时间等实际约束条件,以作业总完成时间最小为目标,并设计了改进粒子群算法来求解模型^[34];Kaveshgar 等建立了一个混合整数规划模型,考虑了集装箱间的优先权、堵塞、岸桥间相互干扰以及岸桥安全距离等实际约束条件,目的是为了减少作业总完成时间,并设计了一种遗传算法与贪婪算法相结合的算法求解问题^[35];Lee 等研究了泊位分配和场吊调度的集成调

度问题,建立了一个混合整数规划模型,目标是为了缩短集装箱码头的总成本,并设计了模拟退火启发式算法进行求解^[36],但未考虑重新搬运的问题,且只考虑了一个场吊负责一个场区的情况;Assadipour 等研究了带有时间窗的岸桥和场吊间集成调度问题,建立了一个以减少作业总完成时间为目标的混合整数规划模型,并设计了改进的遗传算法^[37],但并未考虑任务的优先权和岸桥与场吊间的干扰问题,且认为整个过程中只有 2 个阶段。

随着科技的高速发展,自动化集装箱码头已经越来越普遍,因而自动引导车和自动堆垛机成为主要的研究对象,因此,开始有学者研究自动化集装箱码头的集成调度问题。Shu 等研究了岸桥与自动堆垛机间的集成调度问题,建立了一个多目标数学模型,考虑了倒箱数、自动堆垛机移动频率和目标船舶的配载计划等,并设计了一种基于普通遗传算法的双种群遗传算法求解模型^[38]。

本文针对 2 种设备间的集成调度问题的研究内容、研究目标、模型类型、算法类型、试验规模以及是否同时考虑装载和卸载过程进行了整理,见表 3,可知 2 种设备间的集成调度问题具有如下特点:多数文献针对单一过程(装载或卸载过程)的集成调度进行研究,并以最小化作业完成总时间为目标;多数文献研究的都是传统的集装箱码头,并考虑了在作业过程中与作业设备时间相关的约束条件;多数文献都建立了混合整数规划模型来描述 2 种设备间的集成调度问题,并设计了启发式算法对问题进行求解。

表 3 两种设备间的集成调度研究汇总

Tab. 3 Research summary on integrated scheduling between two equipments

作者(年份)	研究内容	研究目标	模型类型	算法类型	试验规模	是否同时考虑装载和卸载过程
Lee 等 (2011)	泊位分配和场吊调度的集成调度问题	减少集装箱码头的总成本	混合整数规划模型	模拟退火启发式算法	中等规模(30 个工作任务)	是
Tang 等 (2014)	岸桥和集卡间的集成调度问题	减少总完成时间		改进的粒子群算法	大规模(300 个集装箱)	是
Assadipour 等 (2014)	带有时间窗的岸桥和场吊间集成调度问题	减少总完成时间	混合整数规划模型	改进的遗传算法	大规模(375 个集装箱)	是
Shu 等 (2015)	岸桥与自动堆垛机间的集成调度问题	减少倒箱操作次数和岸桥前后移动的频率	多目标数学模型	基于普通遗传算法的双种群遗传算法		否
Kaveshgar 等 (2015)	岸桥和集卡间的集成调度问题	减少总完成时间	混合整数规划模型	遗传算法与贪婪算法相结合的算法	中等规模(30 个工作任务)	是

根据上述分析,本文认为 2 种设备间的集成调度问题未来的研究方向有:在研究岸桥与其他设备集成调度的问题中,为了更加符合实际,需考虑岸桥间的相互干扰与安全距离等实际约束条件;在集卡

参与的集成调度问题中,需考虑集卡在走行路径上可能产生的堵塞问题,从而使集卡与其他设备间的衔接更顺畅,以减少不必要的等待时间;对自动化集装箱码头的研究较少,应加大力度研究其内部的集

成调度问题,并可结合自动化集装箱码头自身的特点进行研究。

3.2 三种设备间的集成调度

3 种设备间的集成调度研究目前已经成为集装箱码头的主要研究内容和方向,这部分研究较为全面地考虑到整个集装箱码头集装箱作业过程中涉及到的问题,因此,可以更好地提高集装箱码头的作业效率。

3 种设备间的集成调度研究主要集中在对岸桥、集卡和场吊 3 种设备间的集成调度问题。Chen 等建立了关于岸桥、集卡和场吊集成调度问题的混合整数规划模型,考虑了优先关系、准备时间和阻塞等约束条件,并同时研究了装载和卸载过程,还设计了禁忌搜索算法对模型进行求解^[39],之后,Chen 等又对问题进行了改进,考虑集装箱在堆场分开堆存,依旧采用禁忌搜索算法求解模型^[40],但仍未考虑集卡在路上的堵塞;Zeng 等研究了岸桥、集卡和场吊间的集成调度优化问题,考虑了优先关系、准备时间和阻塞问题,目的是为了缩短装载过程的总完成时间,建立了一种基于神经网络的代理模型,并应用仿真优化方法求解问题^[41],但是只研究了装载过程;曾庆成等同时考虑岸桥、龙门吊与集卡的调度优化与相互之间的协调,为了更好地求解模型,设计了混合优化算法,即在模拟退火算法中加入神经网络模型,利用神经网络预测、估计目标函数值,并过滤明显的劣势解^[42];Chen 等研究了岸桥、集卡与场吊间的集成调度问题,建立了一个约束规划模型,考虑场吊、集卡和岸桥的空驶走行时间,并利用三阶段算法求解模型,第 1 阶段运用启发式算法产生岸桥调度序列,第 2 阶段在运输任务不同的优先权的基础上求解多辆集卡的路径问题,第 3 阶段运用析取图求解完整过程,目的是为了减少整个过程的总完成时间^[43],但研究中未考虑缓冲空间、集卡间的堵塞等问题;Lu 等研究了岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题,考虑了不确定因素,如集卡走行速度、场吊走行速度和场吊提升/下降操作的单位时间,为了求解该问题,建立了一个集成调度优化模型,目的是为了缩短场吊、岸桥和集卡的操作时间,并设计了粒子群算法^[44],但仅研究了装载或卸载中的一个过程;钱继锋等建立了岸桥-集卡-堆场双向作业计划协同优化模型,以减少内部集卡在码头区域的空驶率,降低客户集港、提箱的等待时间,从而实现系统的整体优化,并设计了混合智能算法对其求解^[45];He 等建立了关于岸桥、集卡和场吊间集成调度问题的混合整

数规划模型,目的为减少船舶总离开延误时间和所有任务的总运输能耗,为了求解模型,设计了遗传算法和粒子群算法相结合的混合算法^[46]。

与 2 种设备间的集成调度研究类似,3 种设备间的集成调度研究中已经涉及越来越多的自动化集装箱码头,因此,对岸桥、自动引导车和自动堆垛机之间的集成调度研究越来越多。Meersmans 等设计了分支定界算法以及定向搜索的启发式算法求解该问题^[47],之后,又研究了动态环境下岸桥、自动引导车和自动堆垛机间的集成调度问题,目标是为了缩短船舶的装载时间,并考虑了不同设备之间的阻碍问题以及延误或等待时间,为了求解该问题,设计了一种基于定向搜索的启发式算法^[48],但只考虑了船舶的装载过程;Lau 等研究了岸桥、自动引导车、自动堆垛机间的集成调度问题,建立了一个混合整数规划模型,目标是为了缩短自动引导车的总走行时间、岸桥操作延误时间以及自动堆垛机的总走行时间,并同时考虑了装载和卸载过程,为了求解问题,提出了多层遗传算法和遗传算法与最大匹配算法相结合的算法^[49],但并未考虑自动引导车间的堵塞问题;Homayouni 等研究了岸桥、自动引导车和存储平台间的集成调度问题,建立了混合整数规划模型,同时考虑了装载和卸载 2 个过程,分别利用模拟退火算法和遗传算法对模型进行求解^[50-51],但是未考虑自动引导车间的堵塞以及设备间的转移时间;Xue 等研究了岸桥调度、集卡调度以及场区位置分配的集成调度问题,并建立了一个混合整数规划模型,同时考虑了装载和卸载过程中岸桥对集装箱的优先权,目的是为了缩短所有岸桥的完成时间和集卡走行时间的加权和,为了求解问题,设计了一个两阶段启发式算法,还考虑了集装箱在不同堆存内没有严格的优先权、集卡到达场吊处无需等待、集装箱从船上装载和卸载时存在一定的优先关系等约束条件^[52]。

本文针对 3 种设备间的集成调度问题的研究内容、研究目标、模型类型、算法类型、试验规模以及是否同时考虑装载和卸载过程进行了整理,见表 4,可知 3 种设备间的集成调度问题具有如下特点:现有研究都是在确定条件下进行,都是在假定所有条件不变的情况下研究设备间的集成调度问题;多数文献以最小化作业完成总时间为目标,并建立混合整数规划模型来描述 3 种设备间的集成调度问题,并较为全面地考虑了问题中的实际约束条件;由于 3 种设备间的集成调度问题是一个 NP-hard 问题,

表 4 三种设备间的集成调度研究汇总

Tab. 4 Research summary on integrated scheduling of three equipments

作者(年份)	研究内容	研究目标	模型类型	算法类型	试验规模	是否同时考虑装载和卸载过程
Chen 等 (2006)	岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题	减少总完成时间	混合整数规划模型	禁忌搜索算法	大规模(100 个集装箱)	是
Chen 等 (2007)	岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题	减少总完成时间	集成模型	禁忌搜索算法		是
Lau 等 (2008)	岸桥、自动引导车、自动堆垛机间的集成调度问题	减少自动引导车的总走行时间、岸桥操作的延误时间以及自动堆垛机的总走行时间	混合整数规划模型	多层遗传算法和遗传算法与最大匹配算法相结合的混合算法	中等规模(64 个集装箱)	是
Zeng 等 (2009)	岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题	减少装载过程的总完成时间	基于神经网络的代理模型	仿真优化方法	大规模(500 个集装箱)	否
Xue 等 (2013)	岸桥调度、集卡调度以及场区位置分配间的集成调度问题	减少岸桥总完成时间和集卡走行时间的加权和	混合整数规划模型	两阶段启发式算法	大规模(200 个集装箱)	是
Chen 等 (2013)	岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题	减少总完成时间	约束规划模型	三阶段算法	大规模(500 个集装箱)	是
Lu 等 (2014)	岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题	减少场吊、岸桥和集卡的操作时间	集成调度优化模型	粒子群算法	中等规模(30 个工作任务)	否
Homayouni 等 (2014)	岸桥、自动引导车和存储平台间的集成调度问题	减少自动引导车和存储平台间的总走行时间与岸桥的总延误时间	混合整数规划模型	遗传算法	中等规模(60 个工作任务)	是
Homayouni 等 (2015)	岸桥、自动引导车和存储平台间的集成调度问题	减少自动引导车和存储平台间的总走行时间与岸桥的总延误时间	多目标混合整数规划模型	模拟退火算法	中等规模	是
He 等 (2015)	与能耗有关的岸桥、集卡和场吊间的集成调度问题	减少船舶的总离开延误时间和所有任务的总运输能耗	混合整数规划模型	遗传算法和粒子群算法结合的混合算法	大规模(500 个工作任务)	是

文献中多采用智能算法或启发式算法来求解;和 2 种设备间的集成调度问题一样,大多数文献都是对传统的集装箱码头进行研究的。

根据上述分析,本文认为 3 种设备间的集成调度问题未来的研究方向有:为了更加符合实际情况,在集成调度问题中,应考虑集卡或自动引导车在行驶路径上的堵塞等约束条件;研究不确定条件下的集成调度问题^[53],考虑在调度作业过程中可能产生的一些突发状况,如设备在运行中出现错误等;随着科技的发展与自动化码头的逐渐兴起,考虑自动化码头中自动化设备与传统码头的不同,研究自动化码头内的集成调度问题。

4 结 语

(1)多数文献都是研究确定条件下传统集装箱码头的集成调度问题,同时考虑了许多与作业时间相关的约束条件。

(2)多数文献的目标都是减少作业过程中的完成时间,且大部分都只考虑了单一目标,尤其是在 3 种设备间的集成调度问题中居多。

(3)由于集成调度问题是一个 NP-hard 问题,多数文献中采用的都是启发式算法来求解问题,且绝大多数方法都可较快地对大规模试验进行求解。

(4)后续应进一步研究动态或不确定条件下的集成调度,可以考虑装卸设备装卸作业的时间不确定性、装卸设备生产效率的不确定性、船舶到港或离港时间的不确定性等。

(5)应将集卡或自动引导车在路径上的堵塞问题、岸桥或场吊的走行时间、相互之间不可跨越以及它们之间的安全距离、集装箱间的优先权等问题考虑在内。

(6)应将成本、能耗以及与环境有关的内容加入到目标中,形成多目标函数问题,并将算法与仿真技术相结合,或设计出求解时间短、求解结果精确的算

法,为集装箱码头提供更加精准的参考数据。

(7)随着自动化码头的逐渐增多,应考虑自动化码头内设备的独特性,研究自动化码头的集成调度问题,从而为自动化码头提供相应的理论依据。

参考文献:

References:

- [1] VIS I F A, DE KOSTER R. Transshipment of containers at a container terminal: an overview[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 147(1): 1-16.
- [2] STEENKEN D, VOß S, STAHLBOCK R. Container terminal operation and operations research—a classification and literature review[J]. *OR Spectrum*, 2004, 26(1): 3-49.
- [3] STAHLBOCK R, VOß S. Operations research at container terminals: a literature update[J]. *OR Spectrum*, 2008, 30(1): 1-52.
- [4] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Storage yard operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(2): 412-430.
- [5] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Transport operations in container terminals: literature overview, trends, research directions and classification scheme[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(1): 1-13.
- [6] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015, 27(2/3): 224-262.
- [7] IMAI A, CHEN H C, NISHIMURA E, et al. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2008, 44(5): 900-920.
- [8] MEISEL F, BIERWIRTH C. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(1): 196-209.
- [9] LIANG Cheng-ji, HUANG You-fang, YANG Yang. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, 56(3): 1021-1028.
- [10] CHANG Dao-fang, JIANG Zu-hua, YAN Wei, et al. Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(6): 975-990.
- [11] ZHANG Can-rong, ZHENG Li, ZHANG Zhi-hai, et al. The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2010, 58(1): 40-50.
- [12] 曾庆成, 胡祥培, 杨忠振. 集装箱码头泊位分配-装卸桥调度干扰管理模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(11): 2026-2035.
- [13] RAA B, DULLAERT W, VAN SCHAEAREN V. An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 14136-14147.
- [14] YANG Chun-xia, WANG Xiao-jun, LI Zhen-feng. An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2012, 63(1): 243-253.
- [15] ELWANY M H, ALI I, ABOUELSEoud Y. A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2013, 52(4): 671-677.
- [16] 桂小娅, 陆志强, 韩笑乐. 集装箱码头连续型泊位与岸桥集成调度[J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(2): 226-229, 235.
- [17] TÜRKOĞULLARI Y B, TASKIN Z C, ARAS N, et al. Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(1): 88-101.
- [18] HAN Xiao-le, LU Zhi-qiang, XI Li-feng. 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.
- [19] TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, MAKUI A, SALAH S, et al. An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, 56(1): 241-248.
- [20] FU Y M, DIABAT A. A Lagrangian relaxation approach for solving the integrated quay crane assignment and scheduling problem[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 39(3/4): 1194-1201.
- [21] FU Y M, DIABAT A, TSAI I T. A multi-vessel quay crane assignment and scheduling problem: formulation and heuristic solution approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(15): 6959-6965.
- [22] DIABAT A, THEODOROU E. An integrated quay crane assignment and scheduling problem[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2014, 73: 115-123.
- [23] THEODOROU E, DIABAT A. A joint quay crane assignment and scheduling problem: formulation, solution algorithm and computational results[J]. *Optimization Letters*, 2014, 9(4): 799-817.
- [24] CAO J X, SHI Q X, LEE D H. A decision support method for truck scheduling and storage allocation problem at container[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(S1):

- 211-216.
- [25] LEE D H, CAO J X, SHI Q X, et al. A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(5): 810-820.
- [26] LEE D H, CAO J X, SHI Q X. Synchronization of yard truck scheduling and storage allocation in container terminals [J]. *Engineering Optimization*, 2009, 41(7): 659-672.
- [27] LUO Jia-bin, WU Yue. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 79: 49-64.
- [28] LUO J B, WU Y, MENDES A B. Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2016, 94: 32-44.
- [29] NIU Ben, XIE Ting, TAN Li-jing, et al. Swarm intelligence algorithms for yard truck scheduling and storage allocation problems[J]. *Neurocomputing*, 2016, 188: 284-293.
- [30] 鲁 渤,吕家智,曾庆成. 集装箱码头 ALV 调度与堆场位置分配集成优化模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1349-1359.
- LU Bo, LYU Jia-zhi, ZENG Qing-cheng. Integrated optimization model for automated lifting vehicles scheduling and yard allocation at automated container terminals [J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2017, 37(5): 1349-1359. (in Chinese)
- [31] BISH E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144(1): 83-107.
- [32] CAO J X, LEE D H, CHEN J H, et al. The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(3): 344-353.
- [33] KOZAN E, PRESTON P. Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals [J]. *OR Spectrum*, 2006, 28(4): 519-537.
- [34] TANG Li-xin, ZHAO Jiao, LIU Ji-yin. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(3): 978-990.
- [35] KAVESHGAR N, HUYNH N. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159: 168-177.
- [36] LEE D H, JIN J G, CHEN J H. Integrated bay allocation and yard crane scheduling problem for transshipment containers[J]. *Transportation Research Record*, 2011(2222): 63-71.
- [37] ASSADIPOUR G, KE G Y, VERMA M. An analytical framework for integrated maritime terminal scheduling problems with time windows[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(16): 7415-7424.
- [38] SHU Fan, MI Wei-jian, LI Xun, et al. A double-population genetic algorithm for ASC loading sequence optimization in automated container terminals[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 73(S): 64-70.
- [39] CHEN L, XI L F, CAI J G, et al. An integrated approach for modeling and solving the scheduling problem of container handling systems[J]. *Journal of Zhejiang University—Science A*, 2006, 7(2): 234-239.
- [40] CHEN L, BOSTEL N, DEJAX P, et al. A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(1): 40-58.
- [41] ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(6): 1935-1944.
- [42] 曾庆成,杨忠振. 集装箱码头集成调度模型与混合优化算法[J]. *系统工程学报*, 2010, 25(2): 264-270.
- ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen. Integrating scheduling model and hybrid optimization algorithm for container terminals[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 25(2): 264-270. (in Chinese)
- [43] CHEN L, LANGEVIN A, LU Z Q. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1): 142-152.
- [44] LU Yi-qin, LE Mei-long. The integrated optimization of container terminal scheduling with uncertain factors [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2014, 75: 209-216.
- [45] 钱继锋,朱晓宁,谢 霞. “岸桥-集卡-堆场”双向作业协同模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(2): 138-143.
- QIAN Ji-feng, ZHU Xiao-ning, XIE Xia. “Quays, trailers and yard” two way operations plan coordinated model[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(2): 138-143. (in Chinese)
- [46] HE Jun-liang, HUANG You-fang, YAN Wei, et al. Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(5): 2464-2487.
- [47] MEERSMANS P J M, WAGELMANS A P M. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[M] // ERIM. ERIM Report Series Research in Management. Rotterdam: Erasmus University Rotterdam, 2001: 1-26.
- [48] MEERSMANS P J M, WAGELMANS A P M. Dynamic scheduling of handling equipment at automated container terminals[M] // ERIM. ERIM Report Series Research in Management. Rotterdam: Erasmus University Rotterdam, 2001: 31-50.
- [49] LAU H Y K, ZHAO Y. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. *International*

- Journal of Production Economics, 2008, 112(2): 665-682.
- [50] HOMAYOUNI S M, TANG S H, MOTLAGH O. A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2014, 270: 545-556.
- [51] HOMAYOUNI S M, TANG S H. Optimization of integrated scheduling of handling and storage operations at automated container terminals[J]. WMU Journal of Maritime Affairs, 2015, 15(1): 17-39.
- [52] XUE Zhao-jie, ZHANG Can-rong, MIAO Li-xin, et al. An ant colony algorithm for yard truck scheduling and yard location assignment problems with precedence constraints[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2013, 22(1): 21-37.
- [53] 常祎妹,朱晓宁. 不确定因素下的集装箱码头车船间装卸作业集成调度[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 115-124.
- CHANG Yi-mei, ZHU Xiao-ning. Integrated scheduling of handling operation between train and vessel in container terminal under uncertain factor[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 115-124. (in Chinese)