

· 综 述 ·

# 自动化集装箱码头设备资源调度优化

初良勇<sup>1,2</sup>, 周于佩<sup>1</sup>, 梁 冬<sup>1</sup>, 许小卫<sup>3</sup>

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建航运研究院, 福建 厦门 361021;  
3. 安徽财经大学管理科学与工程学院, 安徽 蚌埠 233000)

[摘要] 以WOS和CNKI数据库为基础, 利用VOSviewer对检索出的494篇文献进行共词聚类分析, 得出码头设备资源的调度是自动化集装箱码头领域近年来的热点。按照设备资源的种类数量进行分类综述, 提出未来的研究方向。研究表明: 多数文献建立了时间最小化, 装卸效率最高的目标函数, 但近年环境问题日益受到关注, 能耗等相关环境内容加入到目标中考考虑, 形成多目标函数问题; 前期的文献主要针对单一的装卸工艺进行研究, 并取得了较多成果, 在今后研究中, 应结合自动化集装箱码头的特点, 将研究重心转移到自动化集装箱码头的混合工艺上; 多数文献只针对单装或单卸模式进行研究, 而忽略了双周期策略的应用; 多数文献主要研究确定情况下设备资源的调度问题, 随着研究的深入, 不确定情况下的调度问题将会成为未来研究的重点。随着码头装卸量的不断上升, 普通的智能算法求解效率逐渐降低, 未来可以开发更多快速的, 系统化的求解算法。

[关键词] 设备资源; 调度优化; 自动化集装箱码头; 水路运输  
[中图分类号] U 691

## Review on the Optimization of Equipment Resource Scheduling at Automated Container Terminals

CHU Liangyong<sup>1,2</sup>, ZHOU Yupei<sup>1</sup>, LIANG Dong<sup>1</sup>, XU Xiaowei<sup>3</sup>

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Shipping Research Institute of Fujian Province, Xiamen 361021, China;

3. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** Based on two major databases, WOS and CNKI, the 494 documents searched were analyzed by using VOSviewer for co-word clustering, and the conclusion is that the scheduling of terminal equipment resources is a hot issue in the field of automated container terminals in recent years; the review is categorized according to the types of equipment resources, with the future research direction pointed out. The research results show that most literatures have established an objective function that minimizes time and have the highest loading and unloading efficiency. However, as energy consumption issues receive more and more attention, energy consumption and other related environmental content should be added to the target to form a multi-objective

[收稿日期] 2022-08-31

[基金项目] 国家重点研发计划项目 (2017YFC0805309); 福建省自然科学基金项目 (2021J01820); 福建省教育厅项目 (JAT190294; JAT190292)

[作者简介] 初良勇 (1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事港口管理研究。Email: chuliangyong@163.com

function. The preliminary literature mainly focuses on single loading and unloading process, and has achieved a lot of results. In the future, the research focus should be shifted to the hybrid process, taking into account the characteristics of automated container terminals. Most literatures only study the single loading or single unloading mode, and application of the dual – cycle strategy is ignored; most literatures mainly study the scheduling problem of equipment resources under certain conditions. As the research further develops, the scheduling problem under uncertain conditions will become the focus of future research. With the increase of loading and unloading volumes, the solving efficiency of ordinary intelligent algorithms is gradually reduced. In the future, more rapid and systematic solving algorithms can be developed.

**Keywords:** equipment resources; scheduling optimization; automated container terminal; literature review; waterway transportation

## 0 引言

随着科技的发展,自动化逐渐成为未来集装箱码头的发展趋势,如何在自动化集装箱码头有限的资源基础上,合理的分配各类资源以及安排各项作业顺序,提升作业效率,已经成为码头运营的重心所在。自动化集装箱码头的设备资源主要包括码头前沿船舶的自动化装卸设备,码头内集装箱自动化水平运输设备以及自动化堆场作业设备三类。合理利用三类自动化设备资源,并在相关计算机软件的辅助下完成船舶靠泊、集装箱装卸、水平运输、堆存等作业,实现船舶和集装箱进出码头的综合作业系统就叫做自动化集装箱码头的调度系统<sup>[1]</sup>。在这个综合作业调度系统内,各个设备资源相互连接,相互制约,无论忽略了哪一部分都无法使全局获得最优。因此,无论是对单个设备资源进行优化,还是将其结合起来进行优化都显得尤为重要。关于自动化集装箱码头的研究,学术界已经取得了许多成果,但对设备资源调度的优化还缺乏系统的总结和全面客观的分析。因此,本文借助文献计量与信息可视化分析技术,对自动化集装箱码头设备资源调度的国内外文献进行分析,并在此基础上进行梳理和总结,以此来把握自动化集装箱码头设备资源调度优化相关方面的进展与成果,以及发展趋势,为今后进一步深入研究打下基础。

## 1 文献计量分析

本文选取 WOS (web of science) 和中国知网 (CNKI) 数据库进行文献检索, 前者设定检索条件 TS = (automated container terminal scheduling), 后者设定检索条件“自动化集装箱码头设备”或“自动化集装箱码头调度”, 时间跨度取 1950—2021 年, 通过筛选、比较、剔除等方法, 获得 494 篇相关文献。运用 VOSviewer 软件对已整理的文献进行了共词聚类分析, 得出自动化集装箱码头研究的热点图谱, 如图 1 所示。可以看出在研究自动化集装箱码头时, 主要的设备资源有双小车岸桥、自动化轨道吊和 AGV (automated guided vehicle)。

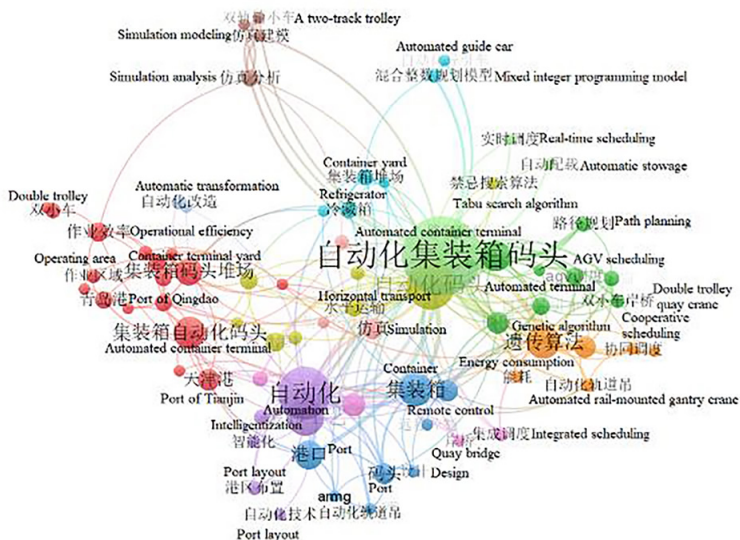


图 1 自动化集装箱码头研究热点图谱

Fig.1 Research hotspot map of automated container terminal

为了进一步地分析研究热点随时间的演化，结合时间维度，分析近年来设备资源调度的研究热点，如图 2 所示。可以看出，近年来，对自动化集装箱码头设备资源调度优化研究主要集中于单一设备资源的调度优化，以及多设备资源的联合和协同调度优化。

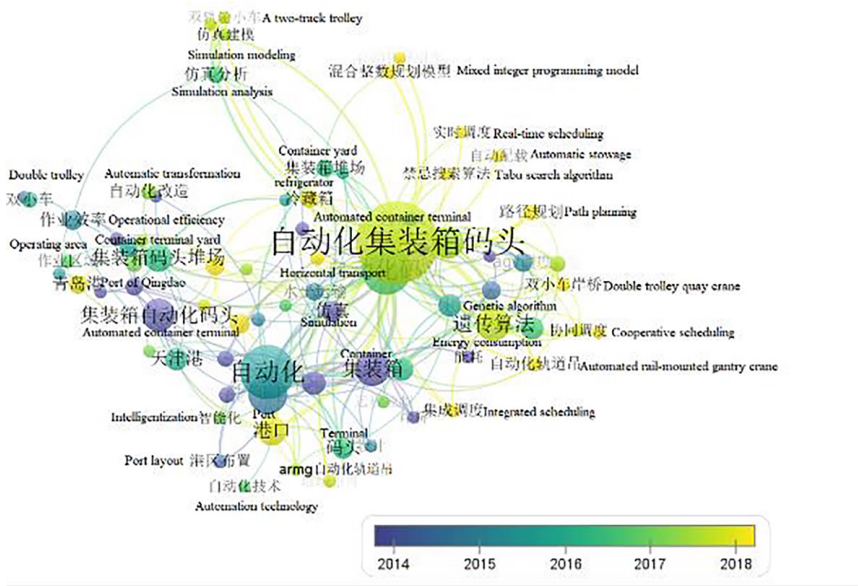


图 2 自动化集装箱码头研究时间图  
Fig.2 Research time figure of automated container terminal

综上所述，针对单一设备资源调度，双资源联合调度和多资源协同调度三个研究热点，本文将进一步总结相应的研究目标、模型类型、研究方法等，进而提出未来的研究方向。

2 单一设备资源调度优化

自动化集装箱码头的设备根据其运作方式主要分为水平运输设备 AGV，垂直搬运设备岸桥、场桥三种。由于自动化集装箱码头的设备配置、装卸工艺和作业空间的限制，优化各环节调度成为提高自动化集装箱码头效率的关键。而岸桥、AGV 和场桥作为自动化集装箱码头的三种重要基础设备资源，三者的调度和分配对提高自动化集装箱码头的运作效率至关重要。

2.1 垂直装卸设备调度优化

2.1.1 岸桥调度问题

岸桥作为码头岸边重要的装卸工具，可以有效地提升集装箱码头的工作效率，加速货物的流转。根据岸桥自身的特点和泊位的重要性，将相关的研究分为泊位与岸桥分配问题，以及岸桥的分配和调度问题。

1) 对于泊位与岸桥的分配问题，Han 等<sup>[2]</sup>研究了船舶到港时间和集装箱装卸时间不确定情况下的泊位和岸桥的同步调度问题，建立了混合整数规划模型，并采用遗传算法对泊位和岸桥的分配调度进行求解。梁承姬等<sup>[3]</sup>为了减少不确定因素带来的影响，增加了缓冲时间；Iris 等<sup>[4]</sup>研究了集装箱码头的综合泊位和岸桥的分配问题，考虑了岸桥边际生产率的下降和由于偏离期望位置而增加的装卸时间的影响，并提出一种自适应大领域搜索（ALNS）的启发式求解方式。杨春霞等<sup>[5]</sup>建立了两个子模型，用来描述泊位与岸桥分配问题；杨劼等<sup>[6]</sup>和史立等<sup>[7]</sup>分析了岸桥调度问题和潮汐对泊位岸桥分布的影响，在此基础上建立了以船舶总服务成本、船舶延迟成本和岸桥移动成本为目标的数学模型；焦小刚等<sup>[8]</sup>考虑了泊位疏浚对泊位岸桥分配的影响，采用多种算法进行求解。

2) 对于岸桥的分配和调度问题，Daganzo<sup>[9]</sup>是研究岸桥分配与调度问题的先驱；Liang 等<sup>[10]</sup>通过对岸桥的调度和配置二者之间关系的分析，建立了耦合模型；Kim 等<sup>[11]</sup>在对岸桥进行调度研究时将



装卸任务看作集装箱组, 并规定了集装箱之间的优先关系, 基于此开发了一个数学模型, 并在随后Chen 等<sup>[12]</sup>的研究中得到了进一步的改进。

2.1.2 场桥的调度问题

堆场是进出口集装箱装卸、堆存的重要区域, 场桥的运行效率对集装箱装卸的工作量有重大的影响。对于场桥的调度问题, Li 等<sup>[13]</sup>考虑场桥之间的干扰关系, 引入时间离散模型; Li 等<sup>[14]</sup>根据现有的研究成果, 转化为场桥的连续时间调度模型进行研究; Park 等<sup>[15]</sup>对场桥的移动速度进行了假定, 同时还考虑了场桥运行时候的碰撞和翻箱问题; Gharehgozli 等<sup>[16]</sup>对堆场内的共享区域的建立进行了模拟, 从而提高了集装箱的处理效率; 裴磊磊等<sup>[17]</sup>在研究双场桥的调度问题时考虑了双场桥之间协调性和缓存区容量限制, 建立了混合整数规划模型。

2.2 水平搬运设备 AGV 调度优化

AGV 作为自动化集装箱码头重要的水平运输工具, 其运作效率将在很大程度上影响码头前沿的装卸和堆场码放的效率。对 AGV 的研究主要可以分为 AGV 的调度问题、AGV 的路径规划问题以及 AGV 的数量规模问题三种, 具体如下。

1) 对于 AGV 的调度问题, Chen 等<sup>[18]</sup>首先提出了利用贪婪算法解决船舶装卸作业中 AGV 调度问题, 但不能满足多船多岸桥同时作业的要求; Bish<sup>[19]</sup>在文献 [18] 的基础上, 进一步推广了变种贪心算法, 将其应用于两艘船舶并用时的 AGV 调度, 取得了良好的效果, 但其结论难以应用于多船 (多于 2) 的情形, 为了解决以上问题, 有学者提出了利用整数规划来优化 AGV 调度问题; Kim 等<sup>[20]</sup>根据多船、多岸桥的联合作业条件, 提出了多目标优化设计的数学模型, 在此基础上, 对装卸过程中的并行操作进行了深入地探讨, 并给出了一个整数规划模型, 但是, 由于这种方法的局限性, 使其在港口的实际应用中效果不好; Grunow 等<sup>[21]</sup>和其他的研究不一样, 对运输两个长 6.096 m (1 英尺 = 0.3048 mm) 集装箱的 AGV 进行了研究, 这一方法挖掘了两个集装箱运输方式的潜能。

2) 对于 AGV 的路线规划问题, Zhong 等<sup>[22]</sup>以最小化 AGV 延迟时间为目标, 实现了多 AGV 无冲突的路径规划集成调度方案; 除了以时间最小化为目标外, 霍凯歌等<sup>[23]</sup>采用 GUROBI 与遗传算法相结合的方法, 以降低作业总成本为目的, 对多载 AGV 的作业过程进行优化, 以此来减少 AGV 运行过程中的路径拥堵问题。此外, AGV 在码头运作过程中还存在着其他不确定性情况, Angeloudis 等<sup>[24]</sup>针对 AGV 在码头中的分配问题, 开发了一种重点关注 AGV 操作特征以及码头内部不确定因素的新调度方法; Choe 等<sup>[25]</sup>在文献 [24] 的基础上提出了更为灵活的 OnPL 在线偏好学习算法, 将 AGV 的调度策略动态地应用于自动化集装箱码头不断变化的情况中。

3) 对于 AGV 的数量规模问题, Vis 等<sup>[26]</sup>采用最小流法求解码头内的集卡数量问题, 但未考虑实际情况; Mantel 等<sup>[27]</sup>将线性模型推广到不确定的情况下, 建立了一个两级排队网络模型, 用于确定自动化码头作业所需 AGV 的数目。

对上述文献进行总结分析, 可以得出, 在研究目标方面, 文献 [2-3, 5, 8, 10-17, 19-22, 27] 以时间最小化为目标, 其余文献主要以成本最低为目标, 目标较为单一; 在模型类型中, 文献 [2-3, 6-8, 11-12, 15, 17, 20, 22, 26] 采用整数规划模型, 整数规划模型是研究单一设备资源调度的主要方法, 混合整数规划模型、0-1 整数规划模型等已经广泛应用于码头单一设备资源的调度, 在未来的研究中可以应用耦合模型进行更深层次的研究; 在算法类型中, 文献 [2-4, 6, 8, 17, 20, 22, 26] 采用单一的启发式算法, 未来可以将多种启发式算法进行融合使用; 在考虑不确定因素方面, 文献 [6, 9-11, 15-16, 23, 26] 未考虑不确定因素, 将可能越来越多的学者转向对不确定因素的考虑。

3 双设备资源联合调度优化

以往的研究注重单独提高岸桥、场桥和 AGV 的作业效率, 近年来许多学者为了提升自动化集装箱码头的整体装卸效率, 逐渐侧重装卸设备两两之间的联合调度研究, 主要有岸桥-AGV 联合调度研

究以及场桥-AGV 联合调度研究两种。

### 3.1 岸桥-AGV 联合调度优化

对于岸桥和 AGV 的联合调度优化,近年来国内外学者的研究方向可以分为寻找集装箱卸载顺序和 AGV 行驶路径两方面。

1) 寻找集装箱卸载顺序方面。陈宁等<sup>[28]</sup>考虑了岸桥作业过程中的不交叉作业、集装箱优先关系等现实约束,分析了中转平台的容量限制;Yue 等<sup>[29]</sup>考虑到装卸时间、AGV 的续航时间、岸桥缓冲平台和滑车等相关约束条件,但没有考虑边装边卸的情况;丁一等<sup>[30]</sup>在基于边装边卸的作业模式下,考虑岸桥中转平台的限制,并采用 CPLEX 进行求解;Chen<sup>[31]</sup>等在装卸同步进行的模式下,不仅考虑了装卸作业过程中的作业成本问题,还加入了 AGV 运输能耗最小这一目标;范厚明等<sup>[32]</sup>在考虑双小车岸桥和 AGV 联合调度的能耗问题时,建立了以岸桥和 AGV 能耗最小为第一、二阶段目标的两阶段模型优化目标,同时,还对 AGV 的续航时间、岸桥中转平台的存储能力、堆场缓冲支架的容量等因素进行了研究。

2) 对于寻找 AGV 行驶路径方面。梁承姬等<sup>[33]</sup>以双小车岸桥门架小车时间窗为约束,加入了双小车岸桥中转平台及其容量限制;Zhao 等<sup>[34]</sup>虽然也在研究过程中加入了对岸桥中转平台容量限制的研究,考虑了装卸同步进行的情况,但其研究目标主要集中于 AGV 和岸桥的能耗问题。

### 3.2 场桥-AGV 联合调度优化

在自动化集装箱码头上进行装卸作业时,场桥与 AGV 之间存在着相互等候的现象,从而导致了码头作业设备之间的不协调和不连贯。目前,国内外研究学者对场桥和 AGV 的联合调度研究主要集中于是否加入缓存区来协调两者之间的调度优化。

1) 对于未加入缓存区方面的研究。Wu 等<sup>[35]</sup>对 AGV 的任务分配、场桥、集装箱堆放、AGV 数目等因素进行了分析;杨勇生等<sup>[36]</sup>也考虑了堆场箱区的堆存问题,通过改变 AGV、岸桥和箱区数量的配置得出 AGV 和岸桥数量的增加对完工时间的影响大于箱区数量的增加对完工时间的影响这一结论;田宇等<sup>[37]</sup>根据自动化码头装卸过程中双循环 AGV 的作业特点,分别设计基于“最早可获得时间”和“最短路径”启发式规则的遗传算法进行求解,通过平均值、最小值、标准方差和求解时间分析任务量、AGV 数量等参数对算法性能的影响,结果表明,“最早可获得时间”启发式规则更适合双循环 AGV 与场桥的联合调度。

2) 对于加入缓存区方面的研究。文家献等<sup>[38]</sup>在考虑到时间窗口和缓冲区能力限制的前提下,确定缓冲区的分布,并对场桥运行次序进行了优化;梁承姬等<sup>[39]</sup>通过改变缓存区的容量来对调度方案的完工时间进行比较,实验结果表明,在一定范围内缓存区的容量对于完成作业时间有较大影响。

对上述文献进行梳理和总结,在研究目标方面,文献[28, 33, 35-39]以时间最小化为目标,其余文献主要以成本、能耗最低为目标;在模型类型方面,由于问题复杂程度的上升,更多文献选择适应性较强的混合整数模型,例如文献[28, 30, 33, 35-36, 38];在算法类型方面,文献[28-29, 36, 38-39]采用单一的遗传算法,其余多采用复合型算法来求解双设备资源联合调度优化这类复杂问题;在应用双周期策略方面,文献[28-29, 35-36, 38]未采用双周期策略;在考虑不确定因素方面,所有文献均未考虑不确定因素。可以看出大多数现有优化模型的输出结果是任务处理的顺序,无法获得搬运设备的运行轨迹,不足以支持自动化码头中多设备的精确调度。在未来的研究中可以引入时间离散化的时空网络建模框架来对设备的运行轨迹进行进一步的研究;由于多搬运设备协调的复杂性,现有的联合调度模型通常采用启发式方法求解,但没有提供测量下限和结果质量的系统方法;大多数文献不再考虑联合调度过程中的不确定性因素,双周期策略应用的频率也有所下降。

## 4 多设备资源协同调度优化

在自动化集装箱码头装卸任务的过程中,由于每个装卸设备的工作范围是灵活可变的,集装箱在

岸桥、ACV 和场桥三者之间的流转分配成为了一个复杂的任务,因此越来越多的学者将研究方向逐渐转移到对岸桥、AGV 和场桥三者的协同调度上来。随着环境污染和能源消耗越来越受到广泛关注,绿色港口逐渐成为未来港口建设的重要方向,因此本文将岸桥、AGV 和场桥三者的协同调度研究分为是否考虑环境因素进行分类研究。

1) 未考虑环境因素。Meersmans 等<sup>[40]</sup>采用分支定界算法求解 AGV、岸桥、场桥协同调度问题;Homayouni 等<sup>[41]</sup>提出了一种遗传算法对三者的协同调度进行优化,并将遗传算法的性能和文献 [40] 提出的最优解进行比较;吴远焰等<sup>[42]</sup>将不同规模的数值模拟结果与 CPLEX 的计算结果进行了比较,表明该方法能够获得质量较高的近似最优解;Lau 等<sup>[43]</sup>利用分层遗传算法和启发式方法,对码头各主要设备的协同作业进行了研究。在三者的协调调度研究中,多数学者致力于时间最小化的目标。栾晨等<sup>[44]</sup>以总运输时间最小化为目标,将双循环模式下的岸桥-AGV-场桥协同调度问题化成混合整数规划模型,运用基于启发式的自适应遗传算法进行求解;Yang 等<sup>[45]</sup>提出了一种设备资源协同调度和 AGV 路径的综合调度方案,研究比较了滚动时域算法和基于拥堵预防规则的双层遗传算法,结果表明,基于拥堵预防规则的双层遗传算法更优;Luo 等<sup>[46]</sup>在研究装载过程船舶停泊时间最小化的问题中,采用自适应启发式算法进行求解;仲美酥等<sup>[47]</sup>在文献 [46] 的基础上采用边装边卸模式,以最小化船舶装卸时间为目标,采用群智能算法获得合理的岸桥-AGV-场桥协同调度方案,并和多个启发式算法的性能进行比较;添玉等<sup>[48]</sup>同样采用边装边卸模式,加入了主要设备成本最低这一目标,设计了遗传算法与启发式策略相结合的协同调度方法;Zheng 等<sup>[49]</sup>同样在边装边卸的模式下,以每艘船在泊位的周转时间最小为目标,建立了多设备资源协同调度模型,求解出堆场存储和船舶积载计划。

2) 考虑环境因素。Roy 等<sup>[50]</sup>采用庞特里亚金的最小原理,以节约能源的方式来提高集装箱码头的工作效率;Xin 等<sup>[51]</sup>提出了一个在提高自动化码头作业效率的同时减少能源消耗的调度方案;He 等<sup>[52]</sup>在总运输能耗最低的基础上,加入了船舶延迟时间最小这一目标;Xin 等<sup>[53]</sup>使用一台岸桥,多个 AGV 和多台岸桥进行协同调度,建立了时间和能源消耗最小化的双目标;艾立红等<sup>[54]</sup>的研究结果表明,能源消耗对装卸机械的作业时间有一定的影响,能源消耗越小,装卸时间也就越长;代江涛等<sup>[55]</sup>提出了一种多目标混合整数规划模型,该模型以总完成时间最少和最小的能量消耗为目标,应用自适应遗传算法进行求解。部分学者将协同调度结合流水车间的思想进行研究,郭婵婵<sup>[56]</sup>和 Yang 等<sup>[57]</sup>根据混合流水车间的作业思路,建立了码头、集卡、场桥多目标优化模型,以缩短作业时间和最小运行能耗为目标。

对上述内容进行梳理总结,在研究目标方面,文献 [40, 43-47] 以时间最小化为单一目标,其余多为能耗最低和时间最小化相结合的混合目标;在模型类型方面,文献 [43-44, 46-48, 52-55] 为混合整数规划模型;在算法类型方面,遗传算法占据多数,例如文献 [41-45, 54-55],其余多为遗传算法和其他算法相结合的混合算法;在应用双周期策略方面,文献 [40-41, 46, 51-53] 未考虑双周期策略;在考虑不确定因素方面,有文献 [41, 43, 45, 50]。综合分析可以看出:1) 大多数现有优化模型目标将时间最小化作为目标,少数文献建立了多目标模型,模型的目标较为单一;2) 在算法的选择上,多数文献应用遗传算法或是基于遗传算法的改进算法,算法应用单一;3) 在考虑能耗问题方面,大部分的研究只考虑了不同工作状态下的能量消耗不同,而忽略了岸桥与场桥在不同工作状态下的单位时间平均能量消耗;4) 在涉及三者的协同调度时,多数文献忽略了对同步装卸的考虑和不确定因素的约束。

## 5 结论与展望

由于外部环境因素的不断变化、科学技术的不断进步,自动化码头的设备调度研究迎来了新的发展方向,全新的技术支持更是为研究带来了新的契机。

### 1) 利用大数据对不确定性因素进行分析



对于整个码头设备调度系统而言,存在众多不确定性因素,内部有集装箱箱量的不确定,水平运输设备的冲突等因素,外部有自然环境、恶劣天气、政策法规、操作不当等会造成港口的安全隐患增加,拥堵,通关时效的增加。大数据分析技术可以实现更加“柔性”的调度,使抵港、靠泊、离泊、装卸等事件的颗粒度细化,能够更精确、更及时地获得港口能见度、风力、潮汐等外界资料,使生产调度更加灵活,并通过电脑进行实时的优化与调节,从而大大提高港口企业的资源利用率和运营水平。

## 2) 算法的创新

由于码头设备调度问题是 NP-Hard 问题,目前的算法多采用传统算法,如遗传算法、粒子群算法等。未来可以结合设备调度的特点,开发其他可以测量下限的,快速的系统方法,求得的结果不仅是处理任务的顺序,更多的要集中于水平运输设备运行路径的确定。

## 3) 绿色高效的智慧港口

港口设备的操作会产生大量的碳排放,现阶段我国的港口正处于转型的初步阶段,对码头设施设在操作层面进行低碳化研究十分必要。为了使经济收益最大化、环境效益最大化、运营费用最低化,需要建立多目标多阶段数学优化模型,考虑到自动化码头中的现实条件约束,做到效益、省时与节能同步高效进行。

## 4) 新兴技术在港口的应用

随着港口智能化、5G 技术的应用,船舶、码头、港口监管等逐渐实现无人化、自动化。一些港口已引进无人集卡 and 智能空轨等智能运输设备。无人集卡无需事先埋设磁钉,应用场景广,可实现传统的自动化向真正的无人化、智能化转变。智能空轨具有智能化、无人化、绿色环保等特点,可实现港口、陆路、铁路联运“零换乘”,在较大程度上减小码头水平运输设备之间的冲突带来的时间耗费。因此,在未来的研究中需要充分考虑智能化带来的设备调度问题,为港口设施设备在新业态下的科学、合理的安排提供一定理论基础。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 彭传圣. 集装箱码头的自动化运转[J]. 港口装卸, 2003, (2): 1-6.
- [2] 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.
- [3] 梁承姬, 吴宇. 不确定环境下集装箱码头泊位与岸桥联合调度[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(7): 212-219.
- [4] IRIS A, PACINO D, ROPKE S. Improved formulations and an adaptive large neighborhood search heuristic for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 105: 123-147.
- [5] 杨春霞, 王诺, 杨华龙. 集装箱码头泊位—岸桥分配耦合优化[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2270-2277.
- [6] 杨劼, 高红, 刘巍. 离散泊位布局下的泊位岸桥动态协调调度[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(3): 265-270.
- [7] 史立, 管明静, 郭金鑫. 考虑潮汐因素的连续泊位和岸桥集成分配研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 116-120.
- [8] 焦小刚, 郑斐峰, 徐寅峰, 等. 考虑泊位疏浚的连续型泊位和动态岸桥联合调度[J]. 运筹与管理, 2020, 29(2): 47-57.
- [9] DAGANZO C F. The crane scheduling problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1989, 23(3): 159-175.
- [10] LIANG C, FAN L, XU D, et al. Research on coupling scheduling of quay crane dispatch and configuration in the container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 125: 649-657.
- [11] KIM K H, PARK Y M. A crane scheduling method for port container terminals[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(3): 752-768.
- [12] CHEN J H, LEE D H, GOH M. An effective mathematical formulation for the unidirectional cluster-based quay crane scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 232(1): 198-208.
- [13] LI W K, YONG W, PRTERING M E, et al. Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J]. Eu-

- ropean Journal of Operational Research,2009,198(1):165-172.
- [14] LI W K,GOH M,WU Y,et al. A continuous time model for multiple yard crane scheduling with last minute job arrivals[J]. International Journal of Production Economics,2012,136(2):332-343.
- [15] PARK T,CHOSE R,Ok RM,et al. Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard[J]. OR Spectrum,2010,32(3):593-615.
- [16] GHAREHGOZLI A H,VERNOOIJ F G,ZAERPOURN. A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal[J]. European Journal of Operational Research,2017,261(1):108-128.
- [17] 裴磊磊,裴道方. 基于仿真优化的自动化集装箱码头双 ARMG 调度研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2017,42(2):500-510.
- [18] CHENG Y L,SEN H C,NATARAJAN K,et al. Dispatching automated guided vehicles in a container terminal[J]. Supply Chain Optimization,2006(98):355-389.
- [19] BISH E K. A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal[J]. European Journal of Operational Research,2003,144(1):83-107.
- [20] KIM K H,BAE J W. A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals[J]. Transportation Science,2004,38(2):224-234.
- [21] GRUNOW M,GÜNTHER H,LEHMANN M. Strategies for dispatching AGVs at automated seaport container terminals[J]. OR Spectrum:Quantitative Approaches in Management,2006,28(4):587-610.
- [22] ZHONG M,YANG Y,DESSOUKY Y,et al. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering,2020,142:106371.
- [23] 霍凯歌,张亚琦,胡志华. 自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题研究[J]. 大连理工大学学报,2016,56(3):244-251.
- [24] ANGELOUDIS P,BELL M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals[J]. Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2009,46(3):354-366.
- [25] CHOSE R,KIM J,RYU K R. Online preference learning for adaptive dispatching of AGVs in an automated container terminal[J]. Applied Soft Computing,2016,38:647-660.
- [26] VIS I F A,KOSTER D,et al. Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal. [J]. Journal of the Operational Research Society,2001,52:409-417.
- [27] MANTEL R J,LANDEWEERD H R A. Design and operational control of an AGV system[J]. International Journal of Production Economics,1995,41(1-3):257-266.
- [28] 陈宁,梁承姬. 基于混合流水车间调度的自动化码头调度研究[J]. 工程研究:跨学科视野中的工程,2018,10(4):373-380.
- [29] YUE L,FAN H,ZHAI C. Joint configuration and scheduling optimization of the dual trolley quay crane and AGV for automated container terminal[J]. Journal of Physics Conference Series,2020,1486:072080.
- [30] 丁一,兰雨雁,林国龙. 自动化码头双小车岸桥-AGV 协同调度研究[J]. 现代制造工程,2018(12):55-61.
- [31] JIAJUAN,CHEN,WEI,et al. Research on integrated scheduling optimization of double-trolley quay crane and AGV in automated terminal[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering,2019:10.
- [32] 范厚明,郭振峰,岳丽君,等. 考虑能耗节约的集装箱码头双小车岸桥与 AGV 联合配置及调度优化[J]. 自动化学报,2020,45(1):1-16.
- [33] 梁承姬,林洋. 自动化码头双小车岸桥与 AGV 协调调度问题研究[J]. 计算机工程与应用,2019,55(10):256-263.
- [34] ZHAO Q,JI S,GUO D,et al. Research on cooperative scheduling of automated quayside cranes and automatic guided vehicles in automated container terminal[J]. Mathematical Problems in Engineering,2019,2019:1-15.
- [35] WU YONG,LI WENKAI,Matthew E H,et al. Scheduling multiple yard cranes with crane interference and safety distance requirement[J]. Transportation Science,2015,49(4):990-1005.
- [36] 杨勇生,冯有勇,梁承姬,等. 自动化集装箱码头自动导引小车与轨道式龙门起重机的协同调度[J]. 上海海事大学学报,2017,38(2):1-6.
- [37] 田宇,周强,朱本飞. 自动化集装箱码头双循环 AGV 与场桥的集成调度研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(4):216-223,243.



- [38] 文家献, 魏晨, 尹宇起, 等. 考虑堆场缓冲区容量的 ASC 与 AGV 集成调度[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(11): 238-245.
- [39] 梁承姬, 刘永强. 带有缓存区的集装箱码头 AGV 和场桥的联合调度[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(24): 247-253.
- [40] MEERSMANS P J M, WAGELMANS A P M. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. ERIM Report Series Research in Management Rotterdam; Erasmus Research Institute of Management, 2001(36): 31.
- [41] 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.
- [42] 吴远焰, 朱瑾, 刘彪, 等. 自动化码头核心设备集成调度优化[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 381-384 + 421.
- [43] LAU H Y K, ZHAO Y. Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals[J]. Annals of Operations Research, 2008, 159(1): 373-394.
- [44] 栾晨, 韩笑乐. 自动化集装箱码头装卸系统的协同调度优化[J]. 机械制造, 2018, 56(4): 84-88.
- [45] YANG Y, ZHONG M, Dessouky Y, et al. An integrated scheduling method for AGV routing in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 126: 482-493.
- [46] LUO JIABIN, WU YUE. Scheduling of container-handling equipment during the loading process at an automated container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 149: 106848.
- [47] 仲美稣, 杨勇生, 周亚民, 等. 基于群智能算法的自动化码头协同调度研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3756-3759.
- [48] 添玉, 王建彬, 陈晶晶, 等. 自动化码头装卸混合模式下 QC、L-AGV 及 ARMG 协同调度方法[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(3): 14-21.
- [49] ZHENG K, LU Z, SUNX. An Effective heuristic for the integrated scheduling problem of automated container handling system using twin 40' Cranes[J]. Computer Modeling and Simulation, 2010(2): 406-410.
- [50] ROY D, DE KOSTER R. Stochastic modeling of unloading and loading operations at a container terminal using automated lifting vehicles[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 266(3): 895-910.
- [51] XIN J, NEGENBORN R R, LODEWIJKS G. Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control[J]. Transportation Research Part C, 2014, 44: 214-230.
- [52] HE J, HUANG Y, YAN W, 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.
- [53] XIN J, NEGENBORN R R, LODEWIJKS G. Rescheduling of interacting machines in automated container terminals[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 1698-1704.
- [54] 艾立红, 韩晓龙. 考虑能耗的自动化码头装卸设备协调调度[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(4): 26-31.
- [55] 代江涛, 韩晓龙. 考虑作业状态能耗的集装箱码头设备协调调度[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(19): 290-298.
- [56] 郭婵婵. 考虑能耗的集装箱码头核心资源调度研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [57] YANG Y, ZHU X, HAGHANI A. Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail-water intermodal container terminals considering energy efficiency[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(3): 199-209.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)