

# 基于 AnyLogic 的钦州港集装箱船 “套泊热接”仿真研究

王鑫<sup>1,2,3</sup>, 田五六<sup>1,2,3,4</sup>, 张金奋<sup>1,2,3</sup>, 杨有贵<sup>5</sup>, 陈日亮<sup>5</sup>

1. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
4. 北部湾大学 海运学院, 广西 钦州 535011;
5. 北部湾港钦州码头有限公司, 广西 钦州 535008)

**摘要:**钦州港是北部湾最大港口之一,2022年吞吐量超过1.7亿t,集装箱吞吐量超540万TEU。目前,钦州港正在考虑采用“套泊热接”调度策略提高集装箱船的运行效率,但缺乏定量分析手段。基于AnyLogic建立钦州港集装箱船“套泊热接”和现有调度模式下的到达港口、锚地等待、进入航道、锚泊作业和离港全过程仿真对比分析模型。仿真结果表明:与现有调度模式相比,“套泊热接”调度模式可将集装箱船平均等待时间减少50.7%,港口服务船舶阈值提高19.5%。研究结果为港口管理部门制定相关政策和交通规则提供理论和数据支撑。

**关键词:**钦州港;船舶调度;套泊热接;集装箱船;AnyLogic仿真

中图分类号:U691

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.006

## AnyLogic-based simulation study of "seamless-connection mode" for container ships in Qinzhou Port

WANG Xin<sup>1,2,3</sup>, TIAN Wuliu<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Jinfen<sup>1,2,3</sup>, YANG Yougui<sup>5</sup>, CHEN Riliang<sup>5</sup>

1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China;
2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. Maritime College, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China;
5. Beibu Gulf Port Qinzhou Terminal Co., Ltd., Qinzhou, 535008, China)

**Abstract:** Qinzhou Port, one of the largest in the Beibu Gulf, had a throughput of over 170 million tonnes and a container throughput of more than 5.4 million TEUs in 2022. The port is currently considering adopting the "seamless-connection mode" scheduling strategy to improve the operational efficiency of container ships. However, quantitative analysis tools are lacking. Using AnyLogic simulation software, this study has created a simulation model of the entire process of arriving at the port, waiting at the anchorage, entering the channel, anchoring, and leaving the port, both under the 'seamless-connection mode' and the existing scheduling modes for container ships at Qinzhou Port. The simulation results show that, compared with the existing scheduling mode, the average waiting time for container ships is reduced by 50.7%, while the

收稿日期:2023-11-30

基金项目:广西科技计划项目(桂科 AB23026132);国家自然科学基金(51920105014;52071247);内河航运技术湖北省重点实验室基金(NHHY2022002)

作者简介:王鑫(2000—),男,硕士研究生,研究方向为船舶调度优化。E-mail: xin.wang@whut.edu.cn

通信作者:田五六(1987—),男,副教授,博士研究生,研究方向为航运风险分析与船舶调度优化等。E-mail: tianwuliu@bbgu.edu.cn。

引用格式:王鑫,田五六,张金奋,等.基于AnyLogic的钦州港集装箱船“套泊热接”仿真研究[J].中国航海,2025,48(2):38-44.

WANG X, TIAN W L, ZHANG J F, et al. AnyLogic-based simulation study of "seamless-connection mode" for container ships in Qinzhou Port[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 38-44. (in Chinese)

threshold value for harbour service ships can be increased by 19.5%. These results provide port authorities with the necessary theoretical and data-driven support to formulate relevant policies and traffic rules.

**Key words:** Qinzhou port; ship scheduling; seamless-connection mode; container ship; AnyLogic simulation

钦州港是北部湾地区最大的港口之一,也是东南亚最重要的水路交通枢纽。2019—2022 年期间,钦州港的货物吞吐量从 1.19 亿 t 增加到 1.74 亿 t,集装箱吞吐量从 302.0 万标箱增长到 540.7 万标箱,预计未来仍将保持增长趋势。随着集装箱船的逐渐增加,对提升港口和泊位的运行效率提出更高的要求,降低集装箱船的等待时间和提高集装箱泊位的利用率成为提升港口服务效率的 2 个关键目标。许多学者使用计算机仿真软件进行分析。彭骏骏等<sup>[1]</sup>使用 FlexTerm 软件建立钦州港全自动化集装箱码头装卸工艺系统,通过分析得出适当增加码头 IGV 数量可提高码头装卸效率。但现有的研究忽视集装箱船进出港过程中的调度问题,在现有的船舶进出港调度模式下,集装箱船等待时间有逐渐增加的趋势,越来越难以满足实际需求,导致出现锚地拥堵和港口整体效率下降等问题。

“套泊热接”调度模式是指在靠泊船舶即将完成作业时,后续船舶提前进入航道,当到达泊位时,前一艘船舶刚好完成作业并离泊。这种新的调度模式可有效缩短船舶等待时间,提高泊位利用率。上海洋山港在开阔式水域进行集装箱船“套泊”作业,青岛港在集装箱船港池实施“套泊热接”作业。目前,关于“套泊热接”调度模式的理论研究较少,赵长宏<sup>[2]</sup>分析日照港石臼港区集装箱船“套泊热接”作业的可行性,然后通过实船进行验证,最后提出“套泊热接”作业安全问题和相应的保障措施。钦州港调度部门也开始考虑实施“套泊热接”模式提升集装箱船的整体运行效率。但该模式对港口效率提升尚未进行有效的定量分析,并且实施“套泊热接”作业模式后需增加相应的安全保障方面的投入,港口管理部门缺乏相应的决策依据,因此有必要开展相应的量化研究。

仿真技术在水路交通领域广泛应用,一般涉及航道、船闸和港口调度等多个环节。港口航道通过能力是港口核心竞争力的关键体现,也是制约大型港口发展的瓶颈之一。针对这个问题,黄泰坤等<sup>[3]</sup>利用 SIMIO 仿真平台建立天津港航道系统仿真模型,比较了双向航道和复式航道通过能力,该研究得到的是航道的理论通过能力,需进一步考虑恶劣天气和临时交管等限制通航因素,以更加适用于实际工程问题。江福才等<sup>[4]</sup>则基于排队论构建港口航道通过能力计算模型,考虑船舶在航道和进出港过

程中的随机规律。船舶之间的交通冲突是造成航道延误的最重要原因之一。针对这个问题,WANG 等<sup>[5]</sup>针对船舶速度变化影响限制航道通行效率的问题,建立船舶交通的 Monte Carlo 模型,发现船速均值和方差以及航道长度是影响交通的最敏感因素,再使用 Design-Expert 软件进行响应面分析,确定船舶到达率,船速均值和方差以及航道长度的高度相关性。刘宗杨等<sup>[6]</sup>使用元胞自动机理论对海港进出港主航道进行离散化建模,提出在弯曲航段设立“警戒区”以约束船舶运动规则的方法,仿真试验得到了航道的船舶流量和航道的最大船舶通过能力,但研究中存在航道仿真数据与实际数据不相符、仿真精度不高等问题。WANG 等<sup>[7-8]</sup>提出受限双向航道中混合船舶的 HSOS (Hybrid Self-Organizing Scheduling) 调度算法和单向受限航道中船舶交通 SSOCA (Ship Self-Organizing Cooperation Algorithm) 协调调度算法。结果表明:与传统的先到先服务 (First Come First Served, FCFS) 调度模式相比,优化后船舶调度模式可极大地提高航道的通行效率,降低船舶的平均延误。

船闸作为水路运输系统中的重要节点,其运行效率对整个航运系统会产生较大影响。吴澎等<sup>[9]</sup>使用离散事件系统仿真模拟船舶随机到闸和闸室分配的过程,比较不同调度规则对通过能力的影响。王超峰等<sup>[10]</sup>针对鄱阳湖船舶失控碰撞船闸问题,利用 Monte Carlo 仿真思想,动态模拟不同工况下的船碰概率和区域界限,为船闸的运行工作提供参考。庄元等<sup>[11]</sup>考虑船闸与航道联合调度的问题,利用元胞自动机原理模拟航道船舶交通流,构建长洲水利枢纽四线船闸系统调度优化模型。传统的船闸通过能力分析通常只能从宏观角度反映船闸的交通运行状态,难以从微观层面对船闸的运行状态参数进行定量分析。廖鹏等<sup>[12]</sup>则基于国内典型船闸的交通运行规则,设计船舶过闸交通模型的启发式求解算法,仿真重现了船闸的实际交通运行状态。李松龙等<sup>[13]</sup>研发一种船舶编队过闸航行三维实时仿真系统,实现船舶纵向、横向编队全过程三维实时动态仿真,该系统解决了船舶编队在船闸水域进行实船试验成本高且安全性不足的问题。

港口是一个由锚地、航道和码头泊位等要素组成的系统,其运营效率依赖各要素之间的相互协调。传统方法难以适应随机、动态的环境变化,但基于仿

真软件建立交通流模型可定量评估各因素对港口运营效率的影响。姚海元等<sup>[14]</sup>将港口内各要素视为智能体,并被赋予不同的属性、功能和运行规则,各智能体之间相互通信协作,共同完成船舶进出港全过程的模拟。左天立等<sup>[15]</sup>将航道通过能力和港口服务水平的目标函数与多智能体模型仿真相结合,建立复杂水域下的沿海进出港航道仿真模型。于旭会等<sup>[16]</sup>利用 AnyLogic 软件建立集装箱港口多智能体仿真模型,为设备的灵活调度提供支持。离散事件仿真软件具有适应港口动态环境变化、真实描述港口系统运行过程和实时获取港口船舶运行数据等优点。

本研究利用 AnyLogic 仿真软件建立钦州港集装箱码头“套泊热接”仿真系统,定量对比分析与现有调度模式相比整体效率的提升幅度,探究 2 种调度模式混合使用的可行性以及 2 种调度模式并行的最佳比例,为港口管理部门制定相关决策提供参考和依据。

## 1 钦州港“套泊热接”仿真模型

### 1.1 “套泊热接”作业模式

钦州港拥有世界上最先进的自动化集装箱码头,从提高泊位集装箱调度水平的角度提升运行效率的空间非常有限,而进出港环节的运行效率则有很大的改进空间。为提高运行效率,钦州港集装箱船“套泊热接”船舶调度具体流程如下:同一泊位的下一艘船舶在上一艘船舶即将离开泊位时,提前进入进港航道;通过对进港船舶的船速和泊位船舶的作业速率进行控制,当上一艘船离开泊位时,下一艘船可无缝衔接靠泊。针对上述过程建立钦州港集装箱船调度的仿真模型,并与现有的进港船舶调度模式进行定量比较。

当集装箱船抵达港口时,如果没有可用的泊位,将在锚地等待,钦州港“套泊热接”示意图见图 1。根据钦州港历史数据,大多数集装箱船选择在外 1<sup>#</sup>锚地锚泊,然后从钦州湾东航道进入泊位,钦州港外 1<sup>#</sup>锚地位于东航道南端起点东侧,船舶起锚后即可进入航道(套泊船从港外 1<sup>#</sup>锚地进入东航道不计入总航程)。套泊船进入东航道后沿东航道南段、三墩段和大榄坪段到达套泊泊位前方水域,全长共 13.5 n mile,单次航程大约 2 h。

### 1.2 AnyLogic 仿真模型搭建

AnyLogic 是一款应用广泛的建模仿真工具,支持离散事件系统、系统动力学和多智能体等多种方法,可广泛用于众多领域,如物流、供应链、制造业、

交通、业务流程、服务系统、应急管理地理信息系统、公共政策、港口和机场等。



图1 钦州港“套泊热接”示意

Fig. 1 Schematic diagram of Qinzhou Port's "seamless-connection mode"

集装箱船进出港的过程是由一系列连续变化构成的交通系统,利用 AnyLogic 离散事件系统,建立的钦州港集装箱船进出港仿真流程见图 2,模型主要包括以下模块:

- 1) 船舶到达模块;
- 2) 锚地等待模块;
- 3) 船舶调度模块;
- 4) 航道调度模块;
- 5) 泊位工作模块;
- 6) 数据导出模块。

这些模块共同构成了对钦州港船舶运营过程的模拟,帮助分析和优化港口运营。

先根据 2022 年钦州港船舶到达率数据随机生成集装箱船,到达时间间隔服从参数为 1.87 h 的泊松分布。根据钦州港的现行规定,仿真模型采用 FCFS 原则。随后在决定是否可进港时,锚泊船需考虑航行限制条件包括如下。

出于安全考虑,船舶应尽量避免在泊位等待,因此需根据上一艘在泊船舶的剩余作业时间判断是否进入航道。

由于集装箱船都是通过钦州湾东航道进入泊位,根据钦州港海事局的规定,为保持安全距离相邻 2 艘进入东航道的船需要至少间隔 0.5 h。

恶劣天气可能导致交通管制和航道关闭,根据 2022 年的钦州港数据,钦州湾东航道实施交通管制

总时间为 170 h,因强风实施交通管制总时间为 420 h,这一情况也被考虑在仿真模型中。

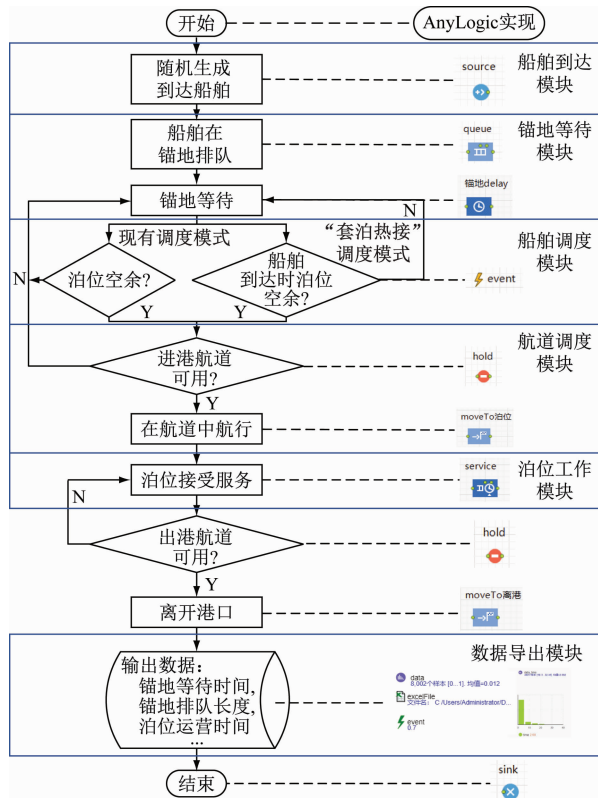


图2 钦州港集装箱船进出港仿真流程

Fig. 2 Simulation flowchart of container ships entering and leaving Qinzhou Port

根据历史数据,泊位作业时间与船舶吨位之间没有明显的相关性,且服从正态分布,平均服务时间为 12.80 h,标准差为 5.66 h。仿真完成后,需对输出数据进行分析,输出数据主要包括集装箱船在锚地的等待时间、锚地排队长度和泊位运营时间等。

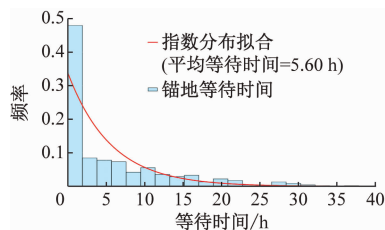
## 2 仿真结果分析

### 2.1 现有船舶数量仿真试验结果及分析

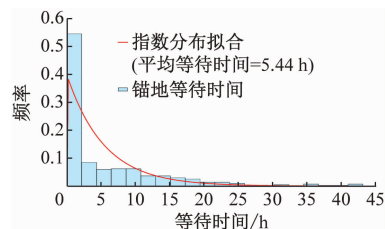
首先基于 2022 年钦州港的集装箱船历史数据进行模拟,并比较仿真结果与真实数据验证模型的准确性。钦州港到港集装箱船 4 379 艘次,根据这一数据,将船舶到达间隔时间期望值设定为 1.87 h,一年内共有 4 400 艘集装箱船抵达港口,与实际情况基本相符。

2 种调度模式下平均等待时间分布及拟合见图 3。真实数据和仿真得到的钦州港集装箱船锚地等待时间及其指数分布拟合结果分别如图 3a 和图 3b 所示。由图 3 可知:历史数据和仿真试验得到的锚地等待时间分别为 5.60 h 和 5.44 h,相对误差为 2.8%,表明仿真能在很大程度上准确反映集装箱船

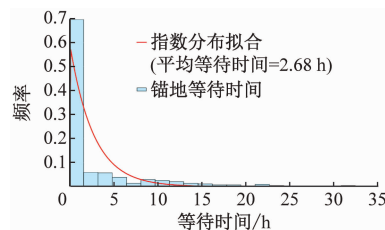
在钦州港的实际运行情况。



(a) 2022 年钦州港集装箱船锚地等待时间分布



(b) 仿真现有调度模式的锚地等待时间分布



(c) 仿真“套泊热接”模式锚地等待时间分布

图3 2022 年钦州港集装箱船真实数据和 2 种调度模式下平均等待时间分布及拟合

Fig. 3 Distribution and fitting of average waiting time in two scheduling modes

为研究“套泊热接”与现有调度模式在效率上的差异,基于 2022 年钦州港到达船舶的数据,进行 2 种调度模式下各项指标数据的模拟分析。仿真“套泊热接”模式锚地等待时间分布如图 3c 所示。“套泊热接”模式平均等待时间为 2.68 h,比现有模式缩短 2.76 h,一年仿真周期内累计减少待泊时间 12 144 h,并且等待时间大于 5 h 的船舶数量也明显少于现有调度模式。2 种调度模式各项指标对比见表 1。由表 1 可知:实施“套泊热接”调度模式后,船舶最大等待时间从 43.2 h 降低至 32.5 h,港口服务指标也从 0.41 优化至 0.20。综上,与现有调度模

表 1 2 种调度模式各项指标对比

Tab. 1 Comparison of metrics between the two scheduling models

指标	现有调度模式	“套泊热接”模式
平均等待时间/h	5.44	2.68
最长等待时间/h	43.20	32.50
港口服务指标	0.41	0.20
泊位利用率/%	73.19	74.36

式相比,“套泊热接”模式可大幅减少船舶等待时间、缓解港口拥堵和提高港口服务水平。

## 2.2 增加到达船舶仿真结果及分析

钦州港正处于快速发展期,未来到港的集装箱船数量会不断增加。通过调整模型中集装箱船到港时间间隔来模拟集装箱船数量逐渐增加情况下2种调度模式的各项指标变化情况,为考虑仿真的随机性,每次仿真随机运行10次,得到2种调度模式下船舶平均等待时间变化趋势见图4。由图4可知:随着到港船数量增加,平均等待时间也逐渐增加,船舶数量较小时,平均等待时间增长缓慢,船舶数量到达一定阈值后,平均等待时间快速增加,表明此时港口拥堵严重。当单个泊位年到达量为490艘次时,现有调度模式的平均等待时间约为19.0h,而“套泊热接”模式仅为3.7h,远低于现有调度模式。

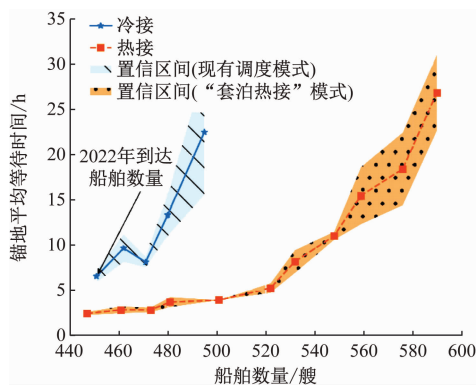
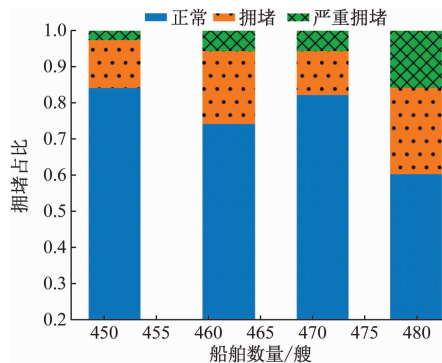


图4 2种调度模式下船舶平均等待时间变化趋势

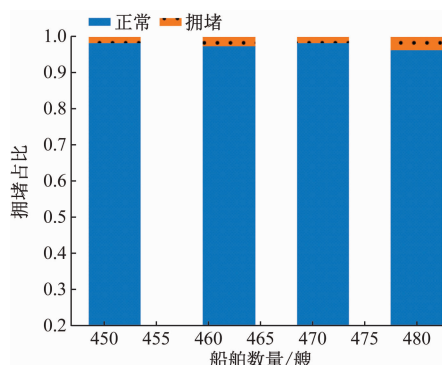
Fig. 4 Trend of average ship waiting time under two scheduling modes

集装箱船的排队长度可直观地反映出交通拥堵状态,在本案例中,排队长度为1表明锚地已有2艘船等待同一泊位,视为拥堵情况,而同一泊位3艘以上在锚地等待则视为严重拥堵。传统船舶调度方式下,港口拥堵情况随着到达船舶的增加不断加剧,单个泊位年船舶到达量480艘时,40%的到港船舶遭遇拥堵情况,15%的船舶遭遇严重拥堵见图5a。但在“套泊热接”模式下,拥堵问题大大改善,船舶在锚地遭遇拥堵的概率下降到5%以下见图5b。

2种模式下的泊位利用率变化趋势,当船舶数量小于500艘时,2种模式的泊位利用率没有明显的区别,主要原因是当船舶等待时间较小时,泊位的总体服务时间与船舶到达数量相关性很弱见图6。而当船舶数量超过500艘后,现有调度模式的泊位利用率不再提升,主要原因是到达船舶超过了港口服务容量,大量船舶等待时间过久导致泊位利用率存在上限。然而,“套泊热接”调度模式的泊位利用



(a) 现有调度模式



(b) “套泊热接”模式

图5 2种调度模式下锚地交通状态分布

Fig. 5 Traffic state distribution under two scheduling modes

率仍在不断上升,最终约达到95%。泊位利用率不再进一步提高的原因是到达船舶存在随机性,当某段时间到达船舶数量不多时,泊位不得处于空闲状态。整体上看,“套泊热接”模式可将泊位利用率的上限由80%提高到约95%。

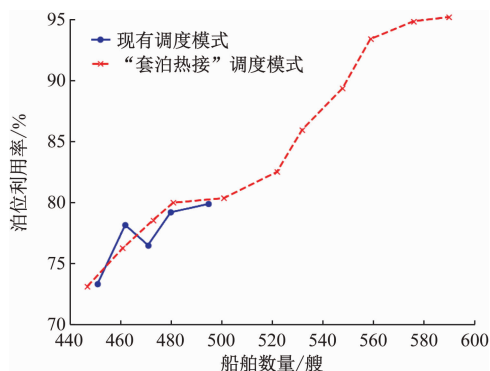


图6 2种调度模式下的泊位利用率变化趋势

Fig. 6 Trends in berth utilization under the two scheduling models

由图6可知:“套泊热接”调度模式能提高服务船舶数量的阈值,从而进一步提高港口泊位利用率。为量化港口服务阈值的差异,不同船舶数量港口服务水平指标变化趋势见图7。国际上广泛使用AWT/AST作为评价码头服务水平的指标,AWT为船舶的平均等待时间,AST为船舶在泊位的停靠时

间。现有调度模式下单个泊位年最佳服务船舶数量约为 455 艘次如图 7 所示,“套泊热接”调度模式则接近 530 艘次。

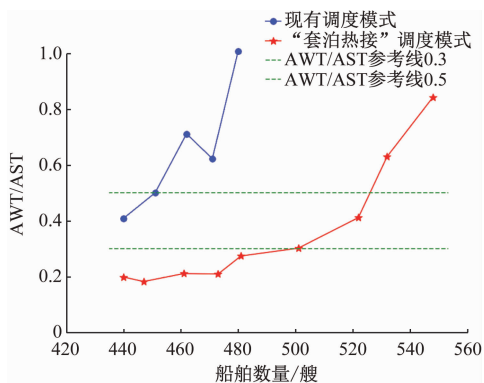


图 7 不同船舶数量港口服务水平指标变化趋势

Fig. 7 Trends in port level of service indicators for different numbers of ships

不同船舶数量最长等待时间变化趋势,当船舶数量超过当前调度模式服务阈值时,最大等待时间会快速增加,不同船舶数量最大等待时间变化趋势见图 8。现有调度模式下,单个泊位年服务船舶阈值约为 470 艘次,而“套泊热接”调度模式则为 560 艘次。综上,在港口交通条件相同情况下,“套泊热接”调度模式相比现有调度模式,最佳服务船舶数值增加 16.5%,年服务船舶阈值增加 19.1%。

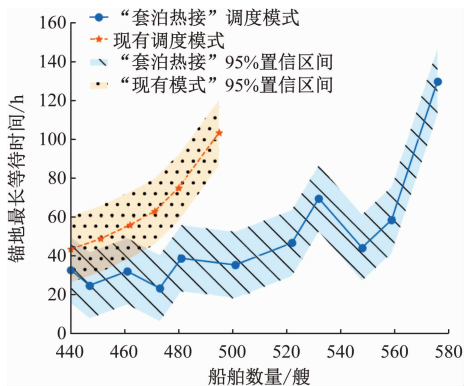


图 8 不同船舶数量最长等待时间变化趋势

Fig. 8 Trends in maximum waiting times for different numbers of ships

### 2.3 2 种调度模式混合下的仿真结果与分析

港口实施“套泊热接”模式后,船舶过早到达泊位水域时可能会等待一段时间,当水流流速较高、能见度不够好或其他不利的航行环境时,这可能会带来额外的风险。因此,现实中钦州港通常会同一泊位的一部分船安排为“套泊热接”模式,而其余船安排为现有调度模式。2 种调度模式并存平均等待时间变化趋势见图 9。由图 9 可知:现有调度模式下锚地等待时间较长,逐渐增加实施“套泊热接”模

式比例至 60%,可大幅降低等待时间,且船舶到达量越大,等待时间下降幅度越大。“套泊热接”模式比例从 60% 提高到 100%,锚地等待时间也在下降,但下降幅度放缓。

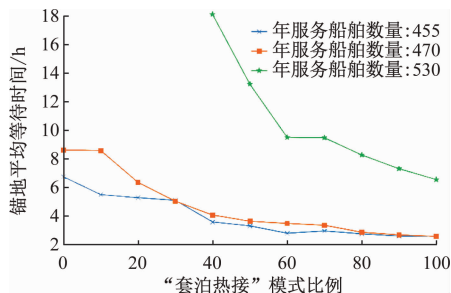


图 9 2 种调度模式并存平均等待时间变化趋势

Fig. 9 Trends in average waiting time in mixed scheduling modes

## 3 结束语

随着钦州港到港集装箱船的不断增长,船舶的等待时间也在不断增加,导致集装箱船处理的整体效率逐渐降低。为提高管理性能,实施“套泊热接”调度模式已被证明是提高效率的最有效的方法之一。对现有调度模式和“套泊热接”调度模式的仿真结果进行比较分析可得出以下结论。

1) 在当前港口交通条件下,对所有到港集装箱船实施“套泊热接”调度模式可将锚地等待时间从 5.44 h 减少到 2.68 h,提高港口的整体效率。

2) 实施“套泊热接”调度模式可减少船舶排队情况发生,可将遭遇拥堵的船舶数量由 40% 下降到 5% 以下。

3) “套泊热接”调度模式通过缩短同一泊位内连续船舶之间的衔接时间来提升港口服务船舶数量阈值,在港口基础设施不变的前提下,将最佳港口服务水平提升 16.5%,极限服务水平提升 19.5%。

4) 考虑到“套泊热接”调度模式会带来额外的安全风险,60% 的“套泊热接”调度模式,40% 的现有调度模式混合是降低锚地等待时间的最佳方案,且到达船舶数量越多,港口服务效率提升越大。

未来研究可探究包括集装箱船的编队类型,泊位的类型(离散泊位和连续泊位)等因素对“套泊热接”调度模式的影响。此外,还需进一步考虑出现突发状况下实施“套泊热接”调度模式是否会带来额外的风险,对该模式进行全面的风险评估并提出一套完整的港口应急处理方案,应对可能出现的各种突发状况。

## 参 考 文 献

[1] 彭骏骏,麦宇雄,梁浩. 钦州港全自动化集装箱码头装

- 卸工艺系统仿真[J]. 水运工程, 2022(10):181-184.
- PENG J J, MAI Y X, LIANG H, et al. System simulation of fully automated container terminal handling process in the Qinzhou Port [J]. Port & Waterway Engineering, 2022(10):181-184. (in Chinese)
- [2] 赵长宏. 日照港石臼港区“套泊热接”作业研究[J]. 中国水运(下半月), 2022(8): 1-3.
- ZHAO C H. Study on the operation of "hot-connection mode" in Shijiu Port area of Rizhao Port [J]. CHINA Water Transport, 2022(8): 1-3. (in Chinese)
- [3] 黄泰坤, 王元战, 李绍武, 等. 海港复式航道通过能力动态系统仿真[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(1): 20-26.
- HUANG T K, WANG Y Z, LI S W, et al. Dynamic system simulation on throughput capacity of compound channel of sea port [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2015, 41(1): 20-26. (in Chinese)
- [4] 江福才, 范庆波, 汪德峰, 等. 基于排队论的东营港规划航道通过能力确定[J]. 船海工程, 2018, 47(3): 128-132.
- JIANG F C, FAN Q B, WANG D F, et al. Determination of the capacity of Dongying Port planning channel based on queuing theory [J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(3): 128-132. (in Chinese)
- [5] WANG H, LIU J, LIU K, et al. Sensitivity analysis of traffic efficiency in restricted channel influenced by the variance of ship speed[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2018, 232: 212-224.
- [6] 刘宗杨, 周春辉, 赵俊男, 等. 基于元胞自动机的航道通过能力建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2478-2487.
- LIU Z Y, ZHOU C H, ZHAO J N, et al. Modeling and simulation of channel passage capacity based on cellular automata[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2478-2487. (in Chinese)
- [7] WANG H, LIU J, ZHANG J, et al. Self-organizing cooperation model for ships navigating in restricted one-way waterway[J]. Brodogradnja, 2018, 69(3):1-23.
- [8] WANG H, TIAN W, ZHANG J, et al. A hybrid self-organizing scheduling method for ships in restricted two-way waterways[J]. Brodogradnja, 2020, 71(2):15-30. .
- [9] 吴澎, 刘春泽, 李明泽, 等. 长洲枢纽既有船闸和扩建船闸的通过能力分析[J]. 水运工程, 2023(8): 56-62.
- WU P, LIU C Z, LI M Z, et al. Capacity of existing locks and planning lock in Changzhou multi-purpose dam [J]. Port & Waterway Engineering, 2023(8):56-62. (in Chinese)
- [10] 王超峰, 刘明俊, 张磊, 等. 鄱阳湖水利枢纽船舶失控漂移建模方法[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 67-73.
- WANG C F, LIU M J, ZHANG L, et al. Modeling of ship out of control and drifting in area of Poyang Lake water control project[J]. Navigation of China, 2023, 46(2): 67-73. (in Chinese)
- [11] 庄元, 黄惠欣, 汪秉义. 基于航道-船闸系统模型的内河多线船闸调度优化仿真[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 80-87.
- ZHUANG Y, HUANG H X, WANG B Y. A navigation channel-ship lock system model for multi-line ship lock running simulation[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 80-87. (in Chinese)
- [12] 廖鹏, 孔庄, 杨春红. 内河单级多线船闸交通建模与仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(3): 414-421.
- LIAO P, KONG Z, YANG C H. Traffic modeling and simulation of single-stage multilane lock in inland waterway[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(3): 414-421. (in Chinese)
- [13] 李松龙, 柳晨光, 初秀民, 等. 船舶编队过闸航行三维实时仿真[J]. 中国航海, 2022, 45(3): 129-136.
- LI S L, LIU C G, CHU X M, et al. Real time 3D simulation of lockage of ship formation[J]. Navigation of China, 2022, 45(3):129-136. (in Chinese)
- [14] 姚海元, 房卓, 郝军, 等. 基于多智能体仿真的LNG船舶进出港通航影响的评价指标研究[J]. 水运工程, 2018(3): 52-58.
- YAO H Y, FANG Z, HAO J, et al. Evaluation index of influence on LNG ships navigation in port system[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(3): 52-58. (in Chinese)
- [15] 左天立, 聂向军, 郝军, 等. 基于多智能体的复杂水域航道通航仿真优化[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 97-101.
- ZUO T L, NIE X J, HAO J, et al. Optimization of coastal channels in complicated waters through multi-agent simulation [J]. Navigation of China, 2017, 40(1): 97-101. (in Chinese)
- [16] 于旭会, 唐国磊, 郭子坚, 等. 基于多智能体仿真的集装箱港口作业效率研究[J]. 水运工程, 2017(9): 83-87.
- YU X H, TANG G L, GUO Z J, et al. Container terminal operational performance based on multi-agent system simulation [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(9): 83-87. (in Chinese)