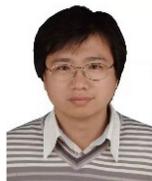


· 信息技术 ·



集装箱堆场高货架存储系统仿真研究*

唐国磊¹, 李梦欣¹, 于倩², 赵晓艺², 颜洪伟³

- 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
- 青岛国际邮轮港开发建设有限公司, 山东 青岛 266005;
- 中国电建江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 为适应港口吞吐量增加和集装箱船大型化发展趋势, 新形式的集装箱港口布局方案、码头生产作业模式应运而生。集装箱堆场高货架存储系统作为一种通过提高储存密度减少港口占地面积的堆场存储方案, 为立体式堆场的发展提供新思路。针对节约集约利用土地资源的建设要求, 以高货架存储系统为研究对象, 通过考虑其系统运行流程的复杂性与不确定性, 建立系统生产作业智能体仿真模型, 验证其有效性, 并分析不同工况下的场桥作业效率, 为我国集装箱堆场改建提供决策支持。

关键词: 高货架存储系统; 多智能体; 仿真; 集装箱堆场

中图分类号: U169.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0197-09

Simulation of high-bay storage system in container yard

TANG Guolei¹, LI Mengxin¹, YU Qian², ZHAO Xiaoyi², YAN Hongwei³

- State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
- Qingdao International Cruise Terminal Development Co., Ltd., Qingdao 266005, China;
- Power China Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to adapt to the increasing throughput of ports and the trend of large-scale development of container ships, new forms of layouts and operation modes of container terminal have emerged. The high-bay storage system(HBS), as a storage solution that reduces land usage by increasing storage density, provides new ideas for the development of three-dimensional storage yards. In response to the construction requirements of conserving and intensively utilizing land resources, we take the high-bay storage system as an research object. By considering the complexity and uncertainty of its operation process, we build an intelligent agent simulation model for the HBS operation, verify its effectiveness, and analyze the efficiency of yard crane operations under different working conditions, which can provide decision support for the reconstruction of container yards in China.

Keywords: high-bay storage system; multi-agent system; simulation; container yard

集装箱堆场是海、陆两侧集装箱运输的缓冲区, 其通过能力和作业效率直接影响整个港口的综合性能^[1-4]。传统集装箱堆场堆箱高度通常在3层以上, 在堆场繁忙时, 堆高会达到6~7层, 这种情况下会出现倒箱作业, 对堆场效率带来不利影响^[5-6],

因而需要发展多样性的总体布局以适应港口的高质量发展^[7-8]。为应对这一问题, Boxbay公司借鉴了立体式自动化仓库的经验, 提出一种创新的集装箱堆场高货架存储系统(high-bay storage system, HBS)。该系统由11层高的货架排列组成, 实现

收稿日期: 2024-03-02

*基金项目: 科技部战略性国际科技创新合作重点专项资助项目(2020YFE0201200)

作者简介: 唐国磊(1980—), 男, 博士, 副教授, 从事港口大数据和智能港口决策支持研究。

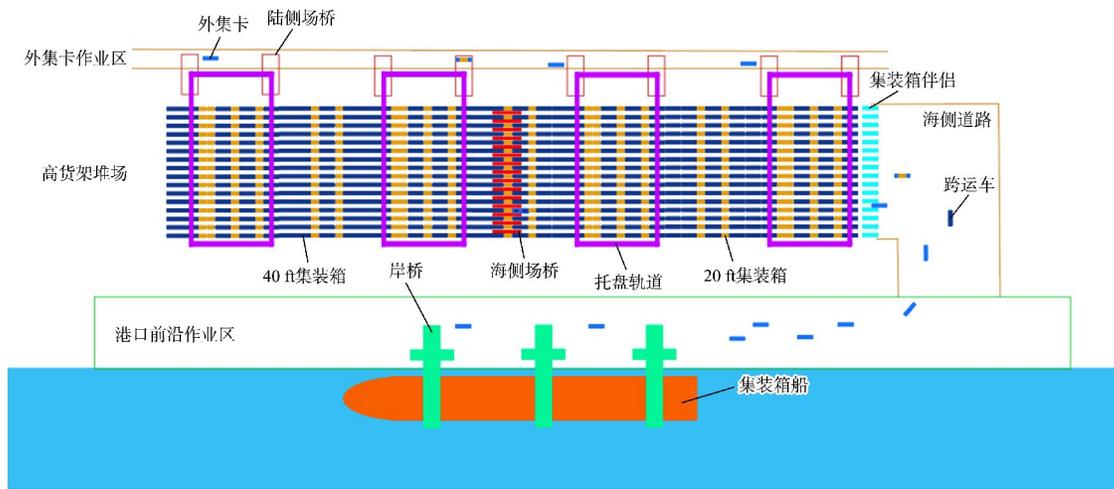
零翻倒箱，通过提高储存密度，在有限堆场面积下增加堆场存储能力^[9-14]。

目前，HBS已在阿联酋杰贝阿里(Jebel Ali)四号码头试运行^[15]，我国集装箱堆场尚未采用类似的HBS。虽然该模式处于探索阶段，但它为港口提高堆存容量提供了新思路。因此，在节约集约利用土地资源的建设要求下，考虑到HBS的复杂性与不确定性，本文应用智能体仿真技术建立HBS生产作业仿真模型以获得性能定量指

标，为我国集装箱堆场改建设计与运营提供决策支持。

1 问题描述

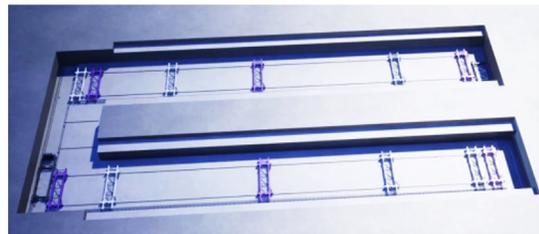
Boxbay公司提出集装箱堆场HBS，通过提高储存密度减少占地面积的堆场存储方案，见图1。HBS由高货架系统、托盘托架轨道系统和陆侧固定场桥作业系统等组成，港外集卡和跨运车作为集装箱水平运输工具。



a) 总平面布置



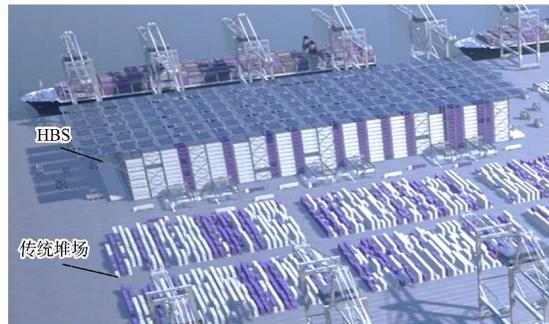
b) 移动场桥



d) 托盘托架轨道系统



c) 固定场桥



e) HBS与传统堆场对比

图1 集装箱堆场HBS概念图

1) 高货架系统由 11 层高的货架排列组成, 这些货架由 40 和 20 ft (1 ft=0.304 8 m) 集装箱货架间隔排布, 且在海侧配置跨运车伴侣, 临时存放集装箱。堆场中每两排货架间设有 1 架可移动场桥 (为陆侧服务港外集卡的固定场桥相对应, 货架间场桥称为海侧场桥), 负责在货架与托架或跨运车伴侣之间运输集装箱。

2) 托盘托架轨道系统位于高货架系统下方, 配置一定数量的托盘和托架沿轨道移动。其中, 托盘负责运输托架, 托架负责运输集装箱, 实现陆海侧场桥之间集装箱的快速交互。

3) 陆侧固定场桥作业系统由陆侧装箱和卸箱场桥组成。卸箱场桥通过吊具将需要存入集装箱堆场的货物从外集卡上取下并放置在托架上, 装箱场桥则通过吊具将需要取出的集装箱从托架上取下并放置在空外集卡上, 实现外集卡和堆场之间的集装箱转移。

HBS 与传统堆场对比见图 1e), 传统堆场能堆 4~5 层高, 一般每个箱区配置 2 台场桥, 负责海陆两侧进出口箱的送提箱任务; HBS 可堆放 11 层集装箱, 无需翻倒箱作业, 2 个陆侧场桥分别负责港外集卡的送提箱作业, 极大提高了单位土地面积的堆存容量, 但需要建设钢结构货架。此外, 两者在装卸流程上存在差异, 以 HBS 进口

箱送、提箱作业为例, 跨运车在码头前沿作业区取箱后前往堆场并将其存放在跨运车伴侣上, 场桥取箱并将其放置在托架上, 通过托盘托架系统移至卸载的货架列, 由海侧场桥吊取集装箱到指定位置进行存放, 实现跨运车送箱; 海侧场桥从指定位置获取集装箱并将其放置到托架上, 通过托盘托架系统移动到陆侧装箱场桥装卸点, 由装箱陆侧场桥吊取集装箱放置到空外集卡上, 实现外卡提箱。

由此可见, HBS 需要通过高货架系统、托盘托架轨道系统和陆侧固定场桥作业系统 3 个子系统协同作业, 而且存在托架、海侧场桥等资源使用冲突等复杂情况, 加之受集卡和跨运车到达随机性的影响, 导致 HBS 是一个复杂的、动态随机的物流系统。因此, 集装箱堆场 HBS 难以用数学方法对其进行有效描述, 亟须建立有效模型, 直观描述生产作业的各个环节及各类实体间的交互与冲突。

2 仿真模型

根据 HBS 的复杂性特征, 采用智能体建模技术, 应用 AnyLogic 的流程建模库、道路交通库、智能体状态变迁图、三维可视化组件, 创建船舶、托盘托架系统、场桥、跨运车等智能体, 实现 HBS 多智能体仿真模型, 其系统架构见图 2。

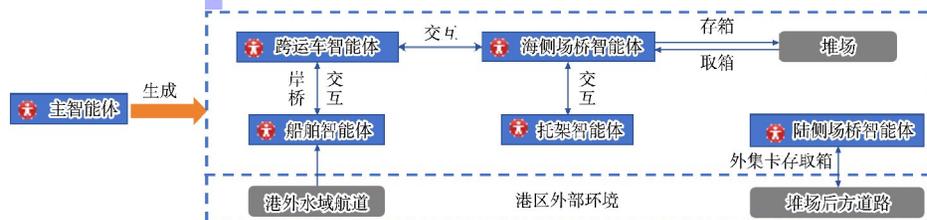


图 2 仿真模型系统架构

1) 主智能体是仿真模型的主要控制智能体, 实现以下功能: 根据港区总平面布置方案初始化码头功能区位置、堆场规模、托盘托架轨道系统与高货架系统; 生成并初始化场桥、跨运车、岸桥、托盘、托架等智能体(群); 根据船舶和外集卡到港规律生成集装箱任务集合, 并实时协调子系统之间的交互作业; 统计装卸设备的作业时间、

作业效率、运行距离等指标。

2) 船舶智能体负责模拟船舶到离港、锚地待泊、船舶进出港航行、靠离泊作业等过程。船舶智能体作业流程见图 3, 集装箱船到港后, 根据泊位空闲情况分配泊位; 获得泊位后判断通航条件是否满足要求; 若满足, 集装箱船驶入航道前往泊位; 否则在锚地待泊; 集装箱船驶入航道, 经

过一段时间航行后靠泊到指定的泊位；辅助作业后开始靠泊装卸作业，待作业完成后释放泊位并离泊离港。

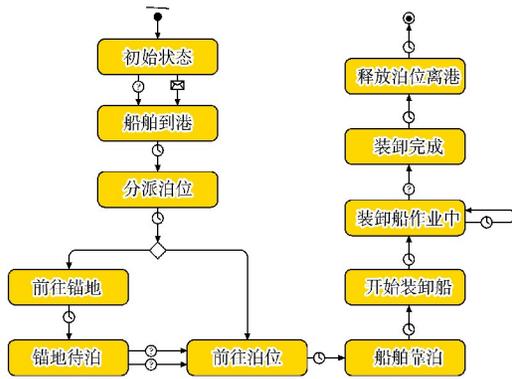


图3 船舶智能体作业流程

3) 托盘托架系统智能体由托盘与托架智能体组成，通过模拟两者之间的协作，实现海侧和陆侧场桥之间的集装箱运输，完成堆场与港外集卡间集装箱传递。托盘智能体作业流程见图4a)，托盘负责循环往复运输托架，直至完成所有装卸任务后停止；托架智能体的作业流程见图4b)，具体为：收到主智能体作业消息后，如果为存箱作业，托架移向陆侧场桥装卸点，取箱后前往海侧场桥装卸点，待海侧场桥取走集装箱后托架随轨道继续移动；如果为取箱作业，托架移动向海侧场桥交接处取箱后前往陆侧场桥装卸点，待陆侧场桥取走集装箱后托架再继续移动。

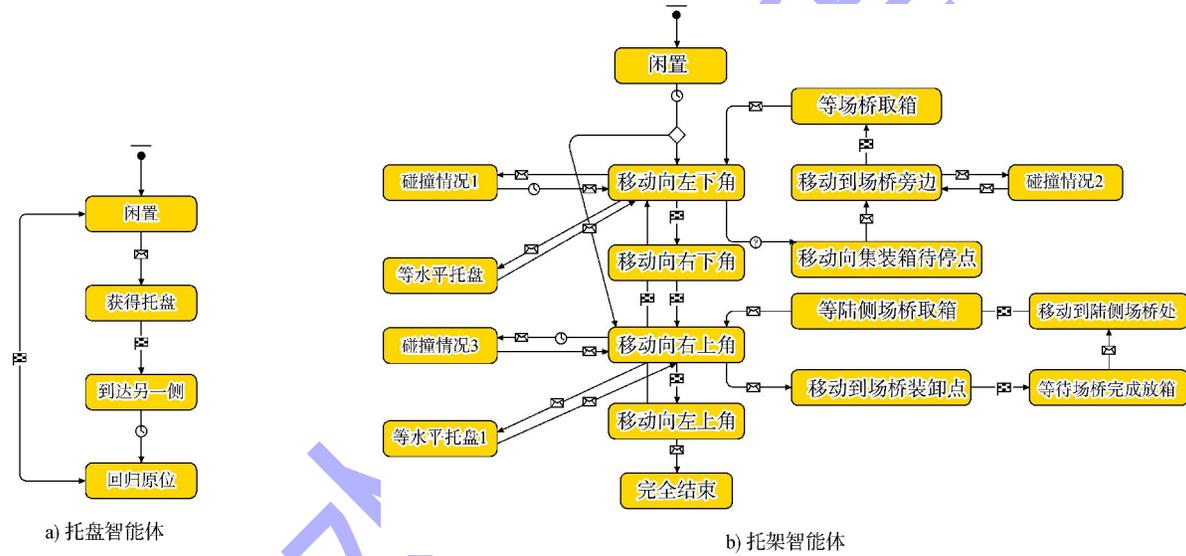


图4 托盘智能体和托架智能体作业流程

4) 海侧场桥智能体由大车和吊具智能体组成，根据主智能体调度中心所给的任务信息执行堆场内集装箱存取作业。海侧场桥智能体作业流程见图5，处于闲置状态的海侧场桥收到作业信息后，移向提箱贝位位置，到达后发送作业任务给吊具；吊具提取指定的集装箱后，海侧场桥根据作业类型移向指定托架；到达托架时，海侧场桥发送作业任务给吊具，吊具将集装箱卸至指定托架，之后海侧场桥返回闲置状态，等待下一个作业任务。

5) 陆侧场桥智能体由大车和吊具智能体组成，通过陆侧场桥、托架、海侧场桥三者的协调配合，实现外集卡和堆场之间的集装箱运输。陆侧场桥智能体作业流程见图6，处于闲置状态的陆侧场桥收到作业任务信息后，发送任务给吊具智能体；吊具智能体移至任务指定位置(外集卡或托架)提箱，完成后移至任务指定的放箱点(托架或外集卡)放箱。任务完成后，陆侧场桥返回闲置状态，并等待下一个作业任务信息。

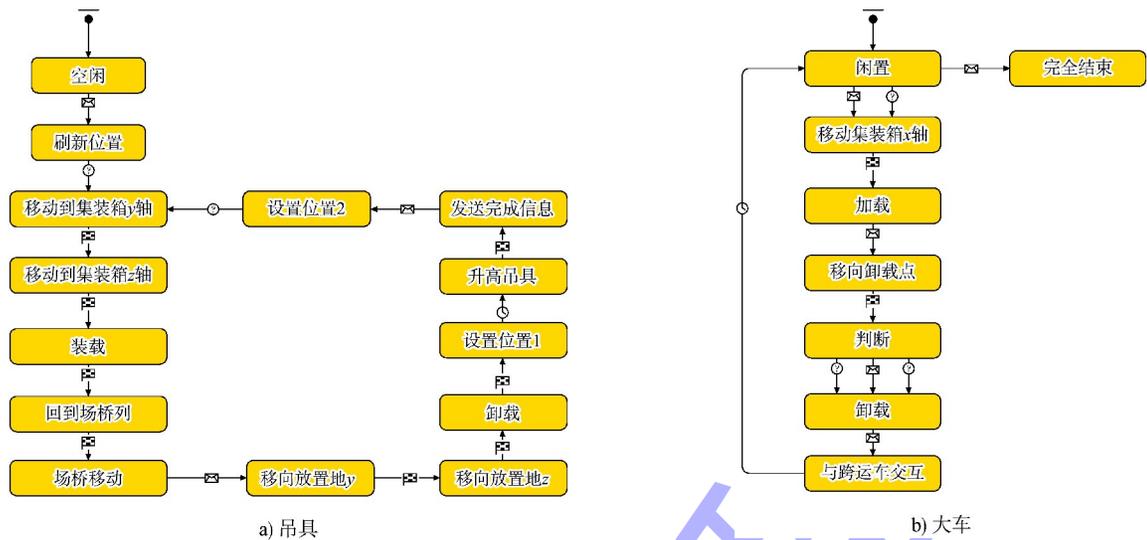


图 5 海侧场桥智能体作业流程

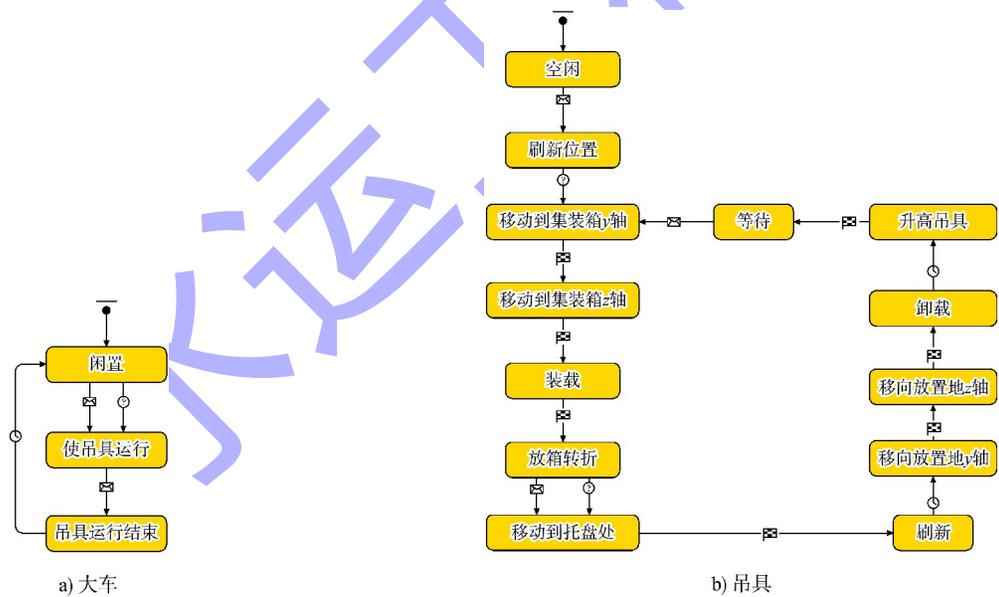
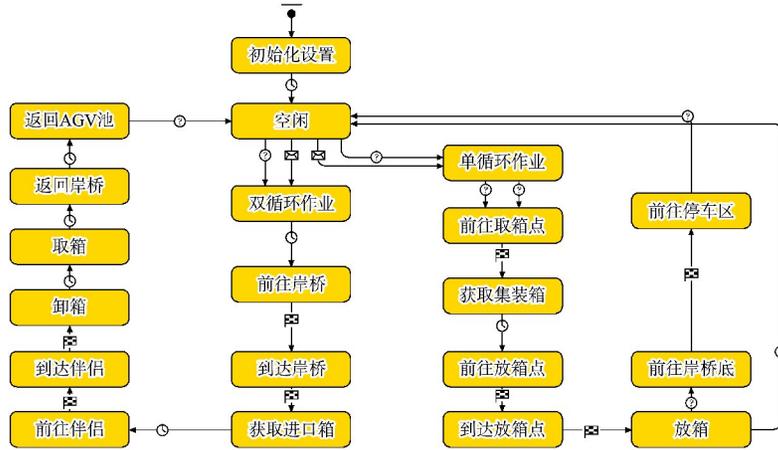


图 6 陆侧场桥智能体作业流程

6) 跨运车智能体负责在港口前沿岸桥处和堆场侧边的伴侣处间运输集装箱。跨运车智能体作业流程见图 7。①单循环作业模式。“空去重回”:空载跨运车先行驶至指定跨运车伴侣,待获得目标箱后,重载跨运车前往指定岸桥装卸点放箱;“重去空回”:从指定岸桥处取箱后,重载跨运车前

往堆场跨运车伴侣,并将集装箱放置在伴侣上,之后空载返回。②双循环作业模式。跨运车前往到达指定岸桥装卸点取箱,待获得目标集装箱后前往 HBS 堆场;到达送箱伴侣后,将集装箱放置在送箱伴侣;前往取箱伴侣提箱,待获得目标箱后,前往指定岸桥装卸点放箱。



注：AGV 为自动导引运输车。

图 7 跨运车智能体作业状态

3 应用实例

3.1 仿真试验参数

以顺岸布置 2 个 15 万吨级集装箱泊位的集装箱码头为例，共 8 架岸桥、16 辆跨运车，堆场采用 HBS，共设置 16 排货架，每排货架可放置 11 层集装箱；货架按照 4 个 40 ft 和 1 个 20 ft 集装箱货架交替布置，共 45 个贝位。每两排货架间配置 1 架移动场桥负责货架集装箱存储作业，货架下在 17#

和 24# 贝位处分别设置 1 个托盘托架轨道系统(包括 2 个托盘和 5 个托架)。此外，在 17# 和 24# 贝位处配置 2 架固定场桥，用于完成外集卡送提箱作业。集装箱水平运输和装卸设备的技术参数见表 1，到港集装箱船吨级及到达比例见表 2，船舶到港规律为负指数分布。对于远洋航线，装卸集装箱中 40 ft 占标准箱总数的 80%，进口箱与出口箱的比例为 1:1，堆存期分别为 7~10 d 和 3~5 d。

表 1 运输和装卸设备技术参数

跨运车和港外集卡 空载、满载速度/ (m·min ⁻¹)	海侧场桥(轨道式起重机)		陆侧场桥(轮胎式起重机) 吊具满载、空载提升速度/ (m·min ⁻¹)	托架、托盘 运行速度/ (m·min ⁻¹)	岸桥装卸 一个集装箱 时间/min
	吊具满载、空载提升 速度/(m·min ⁻¹)	移动速度/ (m·min ⁻¹)			
240、120	35、60	200	30、60	120、30	Triangular(1,2,0,1.5)

注：岸桥装卸一个集装箱的时间最小值为 1.0 min，最大值为 2.0 min，平均值为 1.5 min。

表 2 到港集装箱船属性及到达比例

船舶 吨级	船长/ m	船宽/ m	吃水/ m	载箱量/ TEU	装卸量/ TEU	到达 比例
15 万	398	56.4	16.5	11 001~12 500	3 000~4 000	0.2
12 万	367	45.6	15.0	9 501~11 000	2 500~3 500	0.3
10 万	346	45.6	14.5	6 631~9 500	2 000~3 000	0.5

3.2 仿真模型验证

以海侧 3# 场桥为例，通过分析任务进度时序的仿真结果，验证模型的有效性和正确性。连续作业任务相关信息见表 3，包括出口箱存、取箱和

进口箱存、取箱 4 种作业类型。由仿真试验获得的任务进度时序及海侧场桥贝位变化见图 8、9。

表 3 任务设置

任务 序号	任务到达 时间/s	任务 顺序	作业 类型	起始 贝位	过程 贝位	终止 贝位
1	311	1	陆侧存入	17#	-	26#
2	1 105	3	海侧取出	30#	34#	46#
3	642	2	海侧存入	26#	46#	30#
4	1 070	4	陆侧取出	46#	40#	24#

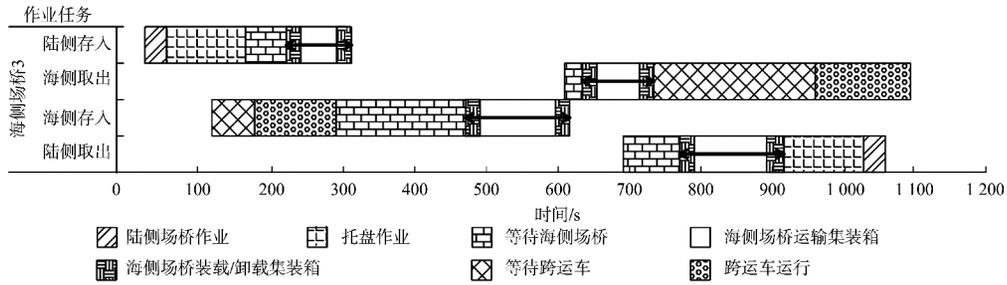


图 8 任务进度时序

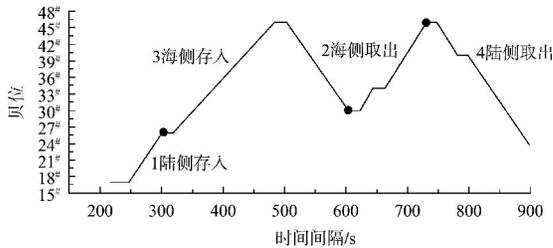


图 9 不同任务下随时间变化的海侧场桥贝位变化

海侧 3# 场桥按顺序执行任务 1、3、2 和 4。具体作业过程为：1) 任务 1 出口箱存箱作业。陆侧固定场桥将集装箱从外集卡移至托架上，托架携带集装箱移至海侧场桥装卸点等待场桥取箱；海侧场桥从 17# 贝位处取箱后移至 26# 贝位存箱。2) 任务 3 进口箱存箱任务。岸桥将集装箱放在装卸车道等待跨运车，跨运车携带集装箱至跨运车伴侣等待场桥取箱；此时，海侧场桥从 26# 贝位移至跨运车伴侣即 46# 贝位处，取箱后再移至 30# 贝位完成存箱任务。3) 任务 2 出口箱取箱任务。海侧场桥从 30# 贝位移至 34# 贝位提取集装箱，并将其放在跨运车伴侣 46# 贝位上；集装箱等待跨运车来取箱，并将其运至岸桥装卸车道。4) 任务 4 进口

箱提箱任务。海侧场桥首先从 46# 贝位移动到 40# 贝位提取集装箱，然后移动到 24# 贝位托架轨道处将集装箱放置托架上；接着，托架携带集装箱到达托盘托架装卸点，最后陆侧固定场桥将集装箱从托架上移至空外集卡。

综上，仿真模型中的智能体及其行为能够以正确的方式模拟集装箱存取作业过程，所建仿真模型合理有效，可用于下一步的研究工作。

3.3 仿真结果分析

为保证仿真结果可靠性，仿真试验运行 20 次取平均值作为场桥作业效率，仿真时间包括预热时间 150 h(包括外集卡送箱时间)和连续装卸作业 318 h(即 7 d)。

3.3.1 不同船舶到港时间间隔下的场桥作业效率

船舶到港时间间隔在 10~32 h 之间变化时对应的场桥平均作业效率见图 10。可以看出，当时间间隔处于 10~23 h，场桥平均作业效率平均值为 32 TEU/h，当时间间隔继续增大，装卸任务量呈现上升趋势，可增长到 33 TEU/h，总体上变化不大。

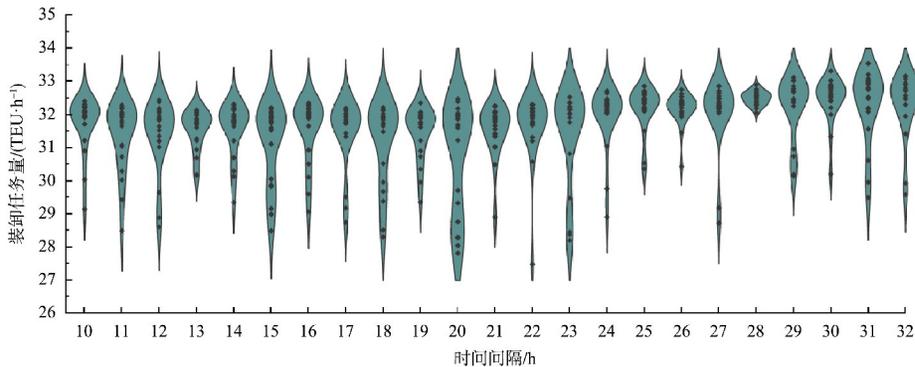
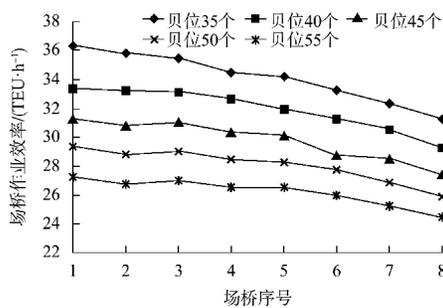


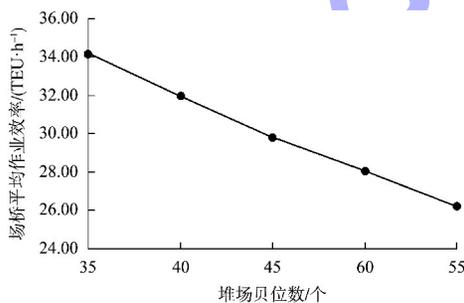
图 10 不同船舶到港时间间隔下的场桥作业效率

3.3.2 不同堆场贝位数的场桥作业效率

在不改变其他输入条件的前提下,堆场贝位数从35~55个之间变化得到海侧场桥作业效率随着贝位数增加的变化曲线见图11。经分析可知:1)在保持海侧场桥数量不变的情况下,随着堆场贝位数量的增加,各台海侧场桥的作业效率均减小,从而导致整体场桥平均作业效率的下降。这表明,尽管增加堆场贝位数可以提高堆场的堆存容量,但由于场桥每次装卸作业的运行路程增加,因此每台场桥的作业效率会相应降低。2)随着海侧场桥与陆侧场桥装卸点的距离增加,场桥作业效率减少。这是因为序号较大的海侧场桥与陆侧场桥装卸点的距离较大,导致海侧场桥在执行陆侧装卸任务时需要更多的时间等待托盘,其作业效率相应地降低。



a) 每台海侧场桥效率随贝位数的变化



b) 所有场桥平均效率随堆场贝位数的变化

注:海侧场桥序号按照其与陆侧场桥装卸点距离编号,其序号越大表示海侧场桥与陆侧场桥装卸点的距离越大。

图11 海侧场桥效率随贝位数变化的情况

由此可见,海侧场桥平均作业效率与堆场贝位数呈较强负相关。在设计HBS时,应根据具体工况合理确定堆场贝位数,以实现高效率的目标。

综上,该仿真模型可有效模拟HBS作业流程,获得不同工况下的场桥作业效率指标,成为评价系统性能的有效工具,可为HBS优化配置与协同优化提供决策支持。

4 投资成本

1) 土地成本。随着港口城市用地的紧张情况日益显现,土地成本所占比例愈发突显^[16-20]。根据本文的仿真结果可知,HBS的通过能力约为180万TEU,货架长500m、宽80m、高50m,占地面积4万m²;根据JTS/T 174—2019《自动化集装箱码头设计规范》^[21],典型的自动化码头处理180万TEU时,堆场所需面积约28万m²。可见,采用HBS可极大地节约用地面积,而且可以通过灵活组合高货架适应集装箱吞吐量的增长。

2) 设备配置。对于2个15万吨级的泊位,HBS堆场配置8架海测场桥和2架陆侧场桥,典型的自动化码头堆场则需要配置30余架场桥,可见,HBS堆场实现零翻倒箱,相应地减少场桥的配置数量,但需要建设钢结构货架和托架托盘轨道系统。

综上,采用HBS可以显著降低土地成本和装卸设备投资,极易适应港口吞吐量增加以及船舶大型化的发展趋势。

5 结论

1) HBS通过提高储存密度减少港口堆场占地面积,可避免翻倒箱作业,降低土地成本和设备投资成本,符合绿色智慧港口的发展趋势,具有极大的发展潜力。

2) HBS是一个复杂的动态随机系统,应用智能体仿真技术构建HBS仿真模型,评估不同定量指标下的海侧场桥平均作业效率,其与堆场贝位数呈负相关。智能体仿真技术可为HBS优化配置与协同优化提供决策支持。

参考文献:

- [1] 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, 93.
- [2] 张彦斌. 天津港集装箱码头堆场系统通过能力研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [3] 唐国磊, 甄中函, 赵卓瑶. 双场桥集装箱堆场效能仿真研究[J]. 水运工程, 2023(7): 60-66.
- [4] 张煜, 魏世桥. 船舶靠泊组合下的泊位年通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2007(11): 41-44.
- [5] 倪敏敏, 单佳. 自动化立体堆场装卸工艺[J]. 水运工程, 2020(10): 82-86.
- [6] 陈苏敏, 曾庆成. 考虑实时调整提箱顺序的码头进口箱翻箱作业调度优化[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(6): 138-145.
- [7] 付鹏成, 宋海涛, 李强, 等. 自动化集装箱码头堆场策略[J]. 水运工程, 2019(10): 32-36.
- [8] 麦宇雄, 刘洋, 梁浩. 自动化集装箱码头平面与工艺总体布局现状与发展趋势[J]. 水运工程, 2022(10): 1-7.
- [9] 佟辉. DP World 发起新一轮装卸革命[J]. 起重运输机械, 2019(7): 26-27.
- [10] 单佳, 倪敏敏, 边志成. 自动化集装箱码头新型布局下的海侧路口交通组织研究[J]. 水道港口, 2021, 42(3): 404-409.
- [11] 辛永宝. 基于信息熵的立体式自动化码头复杂性分析与仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [12] 赵衷彬, 刘伟. “零翻箱”自动化立体堆场设计与码头总体布局[J]. 水运工程, 2022(2): 37-45.
- [13] 温富荣, 宋海涛, 耿卫宁. 新型集装箱立体堆场及其规划设计[J]. 物流技术, 2022, 41(6): 95-100.
- [14] Boxbay. Boxbay will revolutionize the container storing of ports [EB/OL]. [2024-02-19]. <https://www.boxbay.com/boxbay-high-bay-storage>.
- [15] Boxbay. Boxbay-proof of concept[EB/OL]. [2024-02-19]. <https://www.boxbay.com/about-us/reference-dubai>.
- [16] 王旭. 多主体合作博弈下港城土地资源分配模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [17] 李小波. 港口分布格局与城市建设的关联性[J]. 中国水运, 2021(5): 96-97.
- [18] 陈武争. 集装箱港区土地集约利用[J]. 水运工程, 2019(1): 60-66.
- [19] 张志明, 钱立明. 当前我国港口规划中的几个热点问题[J]. 水运工程, 2011(4): 45-50.
- [20] Boxbay. Boxbay applications-cost-effectiveness [EB/OL]. [2024-02-19]. <https://www.boxbay.com/en-us/port-of-the-future/challenges/boxbay-applications/cost-effectiveness>.
- [21] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中国港口协会, 上海振华重工(集团)股份有限公司. 自动化集装箱码头设计规范: JTS/T 174—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

(本文编辑 王璁)

(上接第 159 页)

- [10] 郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与 PIV 试验研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 11-19.
- [11] 兰孝政, 万荣, 唐衍力, 等. 圆台型人工鱼礁单体流场效应的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(8): 47-53.
- [12] 黄远东, 赵树夫, 姜剑伟, 等. 多孔方型人工鱼礁绕流的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 15-18.
- [13] 黄远东, 龙催, 邓济通. 三棱柱型人工鱼礁绕流流场的 CFD 分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 1-4.
- [14] 成泽毅, 叶灿, 高宇, 等. 不同布设间距和来流速度下方型人工鱼礁上升流效应的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(3): 665-678.

(本文编辑 赵娟)