



南沙四期自动化码头外集卡交互 作业能力研究与提升方案

赵飞, 肖权峰, 周晓航, 周伟明, 王武, 严溢

(广州南沙联合集装箱有限公司, 广东 广州 511462)

摘要: 针对广州南沙四期自动化码头所采用的固定边交互模式作业能力不足, 在分析堆场装卸系统和堆场平面布局对外集卡交互能力影响的基础上, 提出工艺优化与布局创新协同解决方案。通过细分交互区功能, 重构作业逻辑, 优化定点作业与装卸衔接的工艺流程, 提出多个交互区拓展设计方案, 选择基于单悬臂轨道吊的U形路径端部交互区堆场布局, 以实现作业环节的高效衔接和码头资源合理再分配利用。采用仿真模型对优化方案进行验证, 结果显示交互区对外集卡的作业能力提高102.00%, 显著突破固定边交互平行布局自动化码头的效率限制。工艺与布局的协同优化能够在低成本条件下实现外集卡效率倍数级提升, 不仅为南沙四期提供了升级路径, 也可为同类码头的自动化改造与新建设计提供参考。

关键词: 自动化码头; 平行布局; 外集卡; 交互区; 优化

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0106-07

Research and improvement scheme for interaction capacity of external trucks at Nansha Phase IV automated terminal

ZHAO Fei, XIAO Quanfeng, ZHOU Xiaohang, ZHOU Weiming, WANG Wu, YAN Yi

(Guangzhou Nansha United Container Terminal Co., Ltd., Guangzhou 511462, China)

Abstract: Addressing the insufficient operation capacity of the fixed-side interaction mode adopted by the Guangzhou Nansha Phase IV Automated Terminal, this study proposes a collaborative solution integrating process optimization and layout innovation, based on researching the impact of the yard loading-unloading system and yard planar layout on the interaction capacity of external trucks. By subdividing the functions of interaction zones, reconstructing the operational logic, and optimizing the process flow for the coordination of fixed-point operations with loading and unloading activities, this study further proposes multiple expansion design schemes for interaction zones. Among these schemes, a yard layout featuring an end interaction zone with a U-shaped path based on single-cantilever rail-mounted gantry cranes is selected, which enables the efficient connection of operational links and the rational redistribution and utilization of terminal resources. A simulation model is adopted to verify the optimized scheme, and the results show that the operational capacity of interaction zones for external trucks is increased by 102.00%, which represents a significant breakthrough in overcoming the efficiency constraints of automated terminals with a fixed-side interaction and parallel layout. The collaborative optimization of processes and layout enables a multi-fold improvement in the efficiency of external trucks at low cost, which not only provides an upgrade path for Nansha Phase IV terminal but also serves as a reference for the automated transformation and new construction design of similar terminals.

Keywords: automated terminal; parallel layout; external truck; interaction zone; optimization

收稿日期: 2025-08-05 录用日期: 2025-09-12

作者简介: 赵飞(1983—), 男, 工程师, 从事自动化码头技术管理工作。

广州南沙四期自动化码头集疏运特点为水转水比例高,2024年水转水比例高达90.86%,日最高外集卡集疏运集装箱量仅占当日吞吐量的11.69%。然而,随着中国“双循环”经济政策的推进,南沙四期正加速向外贸节点转型。外贸箱存在陆路集疏运比例高、货主分散、集港时限要求高等不利因素,南沙港区外贸箱通过公路运输比例长期保持在70%左右,随着南沙四期外贸业务的增长,预计未来集装箱水转水比例将降至80%以下,届时目前的固定边交互区模式将无法满足不同外集卡交互量的需求。

外集卡作为连接自动化码头四大子系统中“堆场装卸系统”与“陆路集疏运系统”的关键,其作业效率直接影响自动化码头的通过能力和服务质量^[1]。堆场布局模式是码头资源配置的一种形式,通过对土地、设备、资本、能耗等资源进行组合配置来塑造堆场能力,满足码头对安全、效率、利润等运营指标的要求。堆场平行布局相较于垂直布局,装卸船作业与集疏运作业之间存在交叉和干扰,港区道路纵横交错易导致水平运输设备路径冲突,对堆场布局提出更为复杂的要求,尤其是堆场装卸设备与内外水平运输设备的交互作业能力,成为制约自动化码头集疏运效率的关键。

交互作业能力是制定作业工艺的关键前提,作业工艺是堆场布局的核心设计依据,而作业工艺的持续完善与堆场布局的适配优化更是提升交互作业能力的主要途径。

1 国内大型自动化码头的平行布局堆场设计

1.1 天津C段为代表的道闸控制模式

人工智能运输机器人(artificial intelligence robot of transportation, ART)与外集卡按照堆场内道闸控制及红绿灯指示,在不同时段通过路径交叉路口,两类车辆在堆场内驶入不同横路车道,实现空间分离,分别进入双悬臂轨道吊两侧进行交互作业^[2],具体布置见图1。

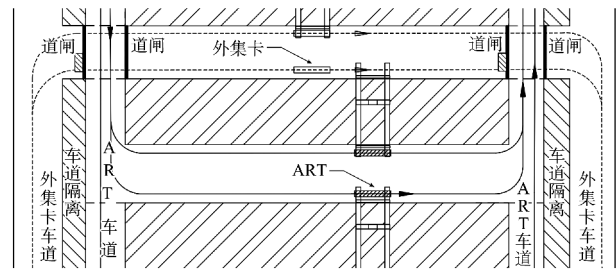


图1 道闸控制堆场与交通路径

Fig.1 Barrier-controlled yard and traffic routes

该模式优点:参与交互作业的堆场多,与外集卡交互作业能力强。缺点:水平运输系统的控制逻辑复杂,ART与外集卡运输在路径上存在物理交叉,对外集卡驾驶能力要求较高,存在一定安全风险;双悬臂轨道吊相较单悬臂轨道吊,交叉路口更多,ART避让更频繁,且堆场堆存能力相对更少。

1.2 上海罗泾港为代表的P形通道模式

外集卡通过堆场端部进入P形通道,在双悬臂轨道吊的外集卡侧完成吊装作业后,行驶至通道尽头的堆场内掉头返回,通过双悬臂轨道吊作业另一侧的智能导引车(intelligent guided vehicle, IGV)实现物理隔离,具体布置见图2。

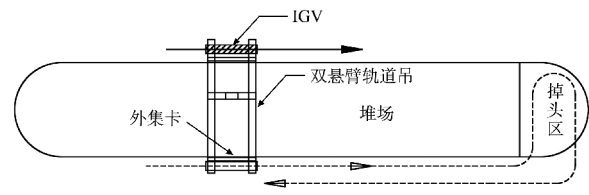


图2 P形通道堆场与交通路径

Fig.2 P-shaped passage yard and traffic routes

该模式优点:内外水平运输设备物理隔离,安全性高,工艺简单,作业效率高,外集卡交互堆场多。缺点:堆场堆存能力的损失程度较大。

1.3 南沙四期为代表的固定边交互区模式

南沙四期交互区堆场设置在自动化区域陆侧,总长1285m,由双悬臂轨道吊作业陆侧外集卡和海测IGV。交互区陆侧设置围栏进行物理隔离,外集卡不进入内堆场区域,整体布局和交通路径见图3。



图3 南沙四期平面布局

Fig. 3 Planar layout of Nansha Phase IV terminal

该模式优点：外集卡不影响自动化水平运输系统作业，自动化设备作业效率高，工艺易于实施和更新迭代^[3]。缺点：难以应对外集卡集中到港，交互区集装箱堆存量高时会产生较多的转堆任务(交互区堆场转内堆场)，拖慢码头的整体生产效率。

2 南沙四期外集卡交互作业工艺分析

2.1 交互区吊装作业流程

根据双悬臂轨道吊动作，对外集卡作业可分为大车行驶、引导外集卡、吊装集装箱3个主要环节。作业双20 ft箱外集卡时，可在第1吊任务进行过程中，同时对第2吊的外集卡位置进行引导(简称同时引导)。同时引导工艺实施时无双悬臂轨道吊“大车行驶”动作，引导对位也与上一吊任务中同时进行，可大幅压缩双悬臂轨道吊任务时间^[4]，工艺流程见图4。双悬臂轨道吊作业同一贝位连续的外集卡队列时，也可在该贝位第2吊实施同时引导工艺，直至完成该队列任务或离开定点位。

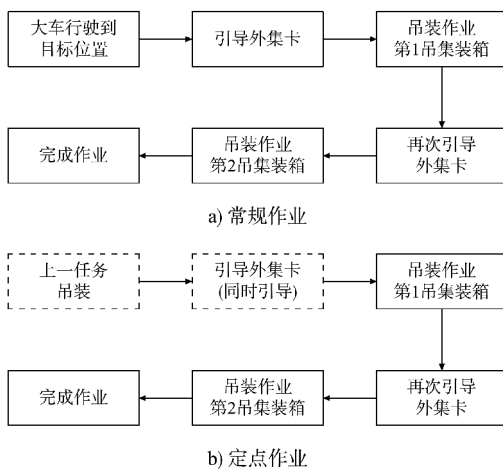


图4 交互区作业流程

Fig. 4 Operational process of the interaction zone

2.2 交互区集装箱运输途径

集装箱在港内常规运输路径为外集卡↔双悬臂轨道吊↔交互区堆场↔双悬臂轨道吊↔IGV↔岸边设备。该路径下，集装箱在堆场内经过双悬臂轨道吊2次吊装和1次IGV水平运输(简称2吊1运)。实现2吊1运的前提为与外集卡交互的堆场必须为目的堆场，即集装箱在港区堆场内不进行转堆。

交互区集装箱堆存能力不足时，需将交互区集装箱与内堆场进行相互转堆作业。交互区堆场和内堆场各自需要2吊1运，共需进行4吊2运才能完成集装箱在堆场内的装卸和运输，严重影响生产效率。

在2吊1运工艺和4吊2运工艺基础上，集装箱不进入交互区堆场，由双悬臂轨道吊实现外集卡和IGV直接交互作业，优化为1吊1运、3吊2运工艺的连接作业模式。连接作业模式在交互区减少1次吊装，但对IGV实时供应能力和内堆场轨道吊作业能力要求更高。

3 固定边交互作业工艺效率提升

现有交互区布局根据外集卡交互任务进行功能细分，在每个功能区采用更适合所属任务分类的作业工艺，提高交互效率。

3.1 交互区功能划分

交互区划分为A、B、C3个区域。A、C区为外集卡收箱区，区域内采用轨道吊定点收箱作业，分别作业仅有送箱任务的外集卡20、40 ft箱，对于来提箱的IGV采用非定点作业，不作业其他类型任务，区域分布见图5。



图5 交互区划分

Fig. 5 Interaction zone division

外集卡在收箱区内按照进入作业队列先后顺序，依次行驶到定点作业位下，禁止插队。交互

区闸口动态控制各定点位置下的外集卡排队长度,保持外集卡不断档的前提下,避免不同队伍间行驶路径交叉现象。

定点作业规则^[5]: 1) 使用多轨道吊轮换,保障作业外集卡不断档的同时,能够灵活应对靠近堆场端侧的IGV作业; 2) 双悬臂轨道吊在定点作业贝位时,未到达该贝位设定堆存量阈值或未接到轮换任务时,不离开定点作业位置; 3) 为保障定点位置更换贝位时外集卡的跟随秩序,定点位置总是由端部向中间移动; 4) 外集卡进入定点作业贝位时,双悬臂轨道吊对上一外集卡作业任务仍在进行,且可以在完成上一吊集装箱装卸任务时,同时完成新进入作业贝位外集卡的引导对位任务。

B区为综合作业区,作业不经过A、C区的集装箱。对于同时有送提箱业务的外集卡,采用“同贝位装卸模式”,双悬臂轨道吊在同一贝位连续作业2~4个集装箱,减少作业流程中双悬臂轨道吊大车行走和引导时间。对于同一贝位提箱外集卡,利用交互区闸口先后顺序放行,形成2~4个外集卡排队序列。

3.2 连接作业的优化

对所提集装箱在船上的外集卡,待集装箱开始IGV运输时,外集卡进入交互区,完成连接作业后,海侧IGV进入收箱区与送箱外集卡进行连接作业,形成IGV1次到交互区2次连接作业的“双连接作业”。在双连接作业中,交互区减少2吊作业,与内堆场增加2吊作业量相抵,IGV由空载返回变为带载返回,可有效减少交互区轨道吊作业吊数和集装箱堆存量,进而提高交互区通过能力。

连接作业模式或双连接作业模式下,目的地为内堆场时会增加内堆场2吊1运作业量,需要控制连接作业的作业吊数,优先选择吊运40 ft箱,

相较双20 ft箱,40 ft箱在吊装次数和IGV等待时间等方面更有优势。

4 改造端部交互区堆场

改造区域需考虑对现有水平运输的影响,A区靠近交互区的7个堆场远离驳船泊位,IGV路径热点少,适合作为端部交互堆场。南沙四期内堆场配备单悬臂轨道吊,无法使用基于双悬臂轨道吊的“道闸控制模式”或“P形通道模式”。

基于以上条件,本文提出以下4个改造选项并进行评估。

4.1 潮汐堆场

通过对内堆场路口进行物理隔离或设置自动化禁行区的方式设置潮汐堆场,IGV和外集卡分别在不同时段进入潮汐堆场内行驶,潮汐堆场范围与外集卡行驶路径见图6。

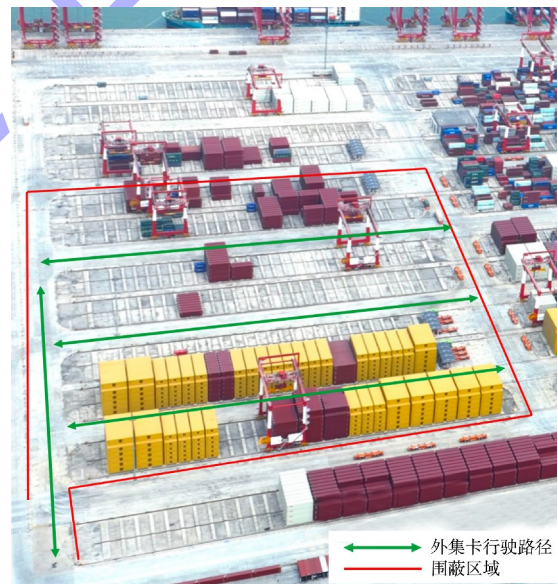


图6 潮汐堆场
Fig. 6 Tidal yard

4.2 垂直堆场

结合纵向道路改造为垂直布局堆场,需要在双悬臂轨道吊两侧各设置作业车道、行驶车道、反向行驶车道,以及外集卡掉头转盘等,建设范围见图7。

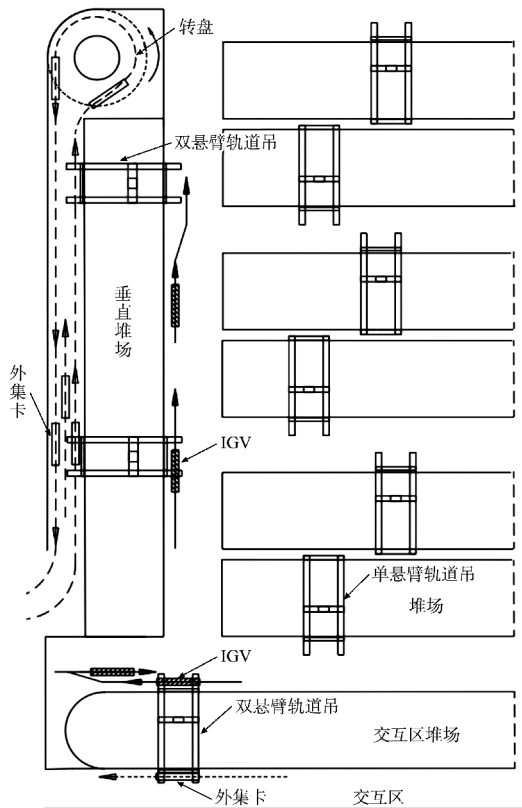


图 7 垂直堆场建设范围

Fig. 7 Construction scope of vertical yard

4.3 端装卸堆场

堆场端部设置多个交互车位，外集卡倒车进入交互车位后与轨道吊交互。在堆场内，由轨道吊带箱行驶大车实现集装箱平移，布局及作业工艺见图 8。

4.4 U 形路径堆场

端部堆场靠悬臂侧 3 排箱位改为两条具备堆存集装箱能力的行车道，再与相邻堆场弧线连接为 U 形路径。外集卡走轨内 U 形路径进出堆场，IGV 在悬臂侧走往复路径，具体布局与交通路径见图 9。

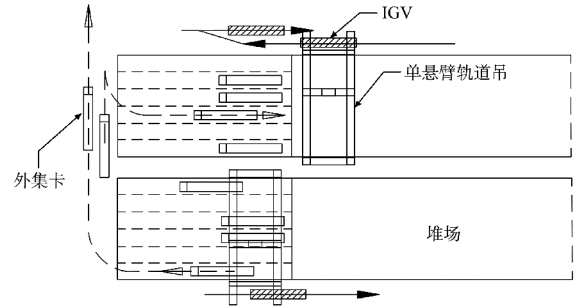


图 8 端部装卸堆场布局及作业工艺

Fig. 8 Layout and operational process of end loading and unloading yard

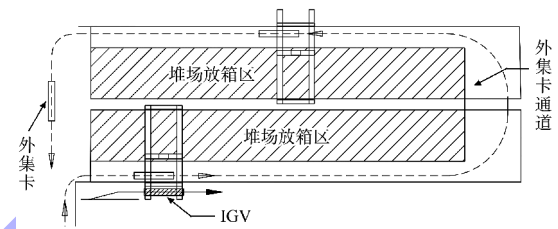


图 9 U 形堆场布局与交通路径

Fig. 9 U-shaped yard layout and traffic path

4.5 方案比选

对 4 种改造方案进行优缺点及可行性分析，结果见表 1。潮汐堆场方案不能及时切换堆场状态，垂直堆场方案堆位不足，端装卸堆场方案投资额大且装卸效率不足，均难以适配平行布局固定边交互区的自动化码头作业需求^[6-7]。U 形路径方案“以局部功能的有限损失换取核心功能的突破性优化”进行资源重新配置，虽然损失 3.39% 整体堆场能力和牺牲 IGV 局部效率，但可形成明显提升的码头对外集卡交互能力，且该方案具备以下特点：外集卡与 IGV 物理隔离；投资额低，基建改造易实施；可动态配置 7~14 台单悬臂轨道吊，灵活性好，可作为优选的改造方案。

表 1 各方案堆场长度及优缺点对比

Tab. 1 Comparison of yard length and advantages and disadvantages of each scheme

方案	堆场长度/m	投资	优点	缺点
潮汐堆场	1 610	极低	装卸能力强,无土建改造费用	无法同时作业外集卡和 IGV,作业装船时限要求高的外贸船时作用有限
垂直堆场	290	高	外集卡在港时间短	占用原端部堆场长度合计 175 m;需增加 2 台双悬臂轨道吊;堆存位少;新建车道影响原内堆场纵路车道连贯性
端装卸堆场	1 610	极高	充分利用现有土建设施,改造较容易	需增加 7 台轨道吊辅助整理堆场并与 IGV 交互;轨道吊每吊需往复行驶大车,装卸效率较低,能耗较高;IGV 行驶路线由环形改为往复式
U 形路径堆场	1 610	低	交互效率高,改造方案易实施	改造堆场损失 30%集装箱堆存能力;IGV 行驶路线由环形改为往复式

5 U 形路径方案堆场仿真与分析

5.1 模型软件及参数设置

采用南沙四期定制化的虚拟生产环境仿真软件 Portsim v1.0 版进行测试, 该软件使用南沙四期真实生产环境的 TOS (terminal operating system, 码头操作系统) 逻辑和 ECS (equipment control system,

设备控制系统) 调度规则, 支持导入 TOS 真实历史数据或以历史数据为基础的修改数据 (如船舶配载、堆场箱位、作业线设置等) 进行全流程生产仿真。仿真作业流程见图 10, 修改相应功能块加入新工艺和交互堆场, 对交互区交互能力进行压力测试, 统计 24 h 交互区对外集卡和 IGV 作业的数量。

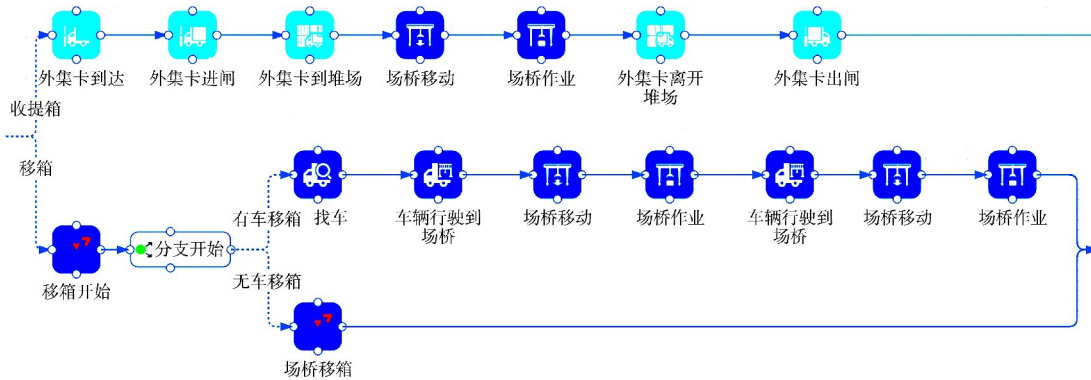


图 10 仿真作业流程

Fig. 10 Simulation operation process

模型主要参数设定: 1) 3 个测试项目均使用相同的繁忙时段历史数据, 设定作业箱中有 35% 箱量经过交互区进行集疏运, 以确保充分利用交互能力; 2) 设定待进闸外集卡数量为 20 辆, 以保证外集卡连续供应; 3) 为防止拥堵, 限定进入交互区的外集卡数量不超过参与交互作业的轨道吊的 4 倍; 4) 除常规移箱任务, 堆场集装箱堆存量超过 75% 时, 触发强制“移箱”作业任务, 下降到 70% 以下关闭强制“移箱”任务; 5) 所有堆场初始集装箱堆存率均为 50%, 仿真开始时堆场侧 IGV 和外集卡均已在作业序列^[8]。

轨道吊配置及作业工艺: 1) 固定边交互区 7 台双悬臂轨道吊作业; 2) 有 U 形交互区交互时, 固定边交互区轨道吊仅使用新工艺中的综合作业区工艺; 3) U 形路径堆场使用 7 台轨道吊进行交互, 另有同轨道 7 台轨道吊动态参与交互作业, 动态参与时间不超过总测试时间的 40%。

5.2 仿真测试结果分析

交互区仿真测试结果见表 2。相较现工艺, 单独使用固定边新工艺合计多交互 294 自然箱, 提

升幅度为 8.03%, 其中 IGV 提升幅度为 2.13%, 外集卡提升幅度为 15.23%。加入端部 U 形路径堆场后, 较现工艺多交互 3456 自然箱, 提升幅度为 94.46%, 其中外集卡提升幅度为 102.00%, IGV 提升幅度为 88.28%。

表 2 交互区仿真测试结果

Tab. 2 Simulation test results of interaction zone

工艺类别	IGV 装卸量/ 自然箱	外集卡装卸量/ 自然箱	合计装卸量/ 自然箱
固定边现工艺	2 014	1 648	3 662
固定边新工艺	2 057	1 899	3 956
固定边+端部 U 形 路径堆场	3 792	3 329	7 121

仿真结果表明, 相比原工艺, 固定边新工艺外集卡装卸量有明显提升, 加入 U 形路径堆场, 外集卡装卸量有了大幅度提升, 方案有效。横路车道为 2 作业车道和 2 通行车道共 4 车道, 使用 U 形路径堆场时, IGV 路径由环形改为往复式, 通行车道由单向中间 2 车道变为双向中间 2 车道, IGV 存在跨 2 个车道寻道、路口拥堵加剧、行驶路径变长、频繁排队避让、更换行驶方向加减速

等新工况。统计 IGV 在横路的平均时间,由环形路径的 4 min 28 s(含吊装等待时间)上升到往复路径的 4 min 55 s;轨道吊等待 IGV 平均时间,由环形路径的 17 s 上升到往复式路径的 26 s,受以上因素影响,IGV 提升幅度较外集卡幅度少 13.72%。

6 结语

1) 交互区分区与定点、同贝位、双连接等作业模式结合,契合运筹学任务分配理论,减少双悬臂轨道吊非必要移动与等待耗时,提升交互区对外集卡作业箱量 15.23%,适配外贸箱陆路集疏运量多、货主分散、集港时限要求高等特点。

2) U 形路径堆场布局创新可行,适配现有单悬臂轨道吊,实现外集卡与 IGV 物理隔离,化解平行布局自动化码头内外水平运输设备路径冲突,以堆场堆存能力损失 3.39% 的代价,换取外集卡交互能力提升 102.00%。

3) 工艺创新与布局优化以南沙四期现有条件为基础,兼具工程可行性与经济适用性,解决外贸转型中外集卡交互瓶颈,满足外贸箱增长的陆路集疏运需求,与相关研究中布局优化需兼顾设备适配性的观点一致^[9]。

4) 未来的研究展望:①数字孪生。未来构建端部 U 形堆场的数字孪生模型,实现更精准的实时调度和预测性维护,从而提升系统运行透明度与韧性^[10-11]。②自动驾驶外集卡协同。外集卡也实现自动驾驶后,如何与码头调度系统进行深度融合,实现路径的协同规划和作业信息的交互,进一步释放 U 形路径方案的潜力^[12]。③人工智能调度。研究应用强化学习等 AI 算法,优化“双连接作业”等复杂工艺的决策过程,进一步增强系统自适应。

参考文献:

[1] 耿卫宁,宋海涛.自动化集装箱码头堆场布局[J].水运

工程,2025(2):81-88.

GENG W N, SONG H T. Layout of automated container terminal yard [J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 81-88.

[2] 陈培,武彬,张煜,等.顺岸式自动化集装箱码头堆场布局设计[J].港口装卸,2022(1):62-65.

CHEN P, WU B, ZHANG Y, et al. Yard layout design of automated container terminal based on mode of parallel to shoreline along yard side[J]. Port operation, 2022(1): 62-65.

[3] 张立斌,李刚.高水水中转比例下的自动化集装箱码头堆场装卸工艺方案比较[J].水运工程,2019(5):78-83,151.

ZHANG L B, LI G. Comparison of container yard handling technology scheme in automated container terminal under high ratio of water to water transshipment [J]. Port & waterway engineering, 2019(5): 78-83, 151.

[4] 赵飞,钟介祥,李树沛,等.自动化码头的对应外拖与轨道吊交互区的作业方法及系统:CN119117710B[P].2025-06-13.

ZHAO F, ZHONG J X, LI S P, et al. Operation method and system for interaction zone between external trucks and rail cranes in automated terminal: CN119117710B[P]. 2025-06-13.

[5] 赵飞,李树沛,肖权峰,等.一种适用于堆场水平布置自动化码头单悬臂轨道吊与外集卡交互作业方法:CN119976430A[P].2025-05-13.

ZHAO F, LI S P, XIAO Q F, et al. Interaction method between single-cantilever rail crane and external container trucks in horizontally arranged automated terminal yard: CN119976430A[P]. 2025-05-13.

[6] 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.

MAI Y X, LIU Y, LIANG H. Current status and development trend of plane and process overall layout for automated container terminals [J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 1-7.

(下转第 142 页)