



罗泾集装箱码头前沿引桥 交通组织仿真研究

张佰望¹, 张 兵², 唐 颖¹, 刘春泽¹, 刘成鑫¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

摘要: 上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程(简称罗泾改造一期工程)投产后, 码头前沿与引桥交叉口的交通拥堵问题成为制约码头运营效率提升的瓶颈。为有效改善这一状况, 研究交通组织优化方案, 并运用系统仿真方法对其优化效果进行验证。研究以港内交通为核心研究对象, 基于码头平面布置、车辆行驶规则和车流路径规划, 构建罗泾改造一期工程码头前沿引桥交通仿真模型。通过模拟码头作业高峰期 AIV(自动智能车辆, automated intelligent vehicle)作业过程, 对交叉口延误时间、岸桥效率和利用率、AIV 循环时间等关键指标进行统计, 对不同交通组织方案展开量化对比分析。研究表明: 相较于当前码头运营的现状方案, 优化后的交通组织方案在减少交通冲突、提升岸桥效率方面成效显著, 并且随着 AIV 配置数量的增加, 该优化方案的优势愈发突出, 为提升码头整体运营效率提供了有力支持。

关键词: 集装箱码头; 交通组织; 系统仿真; AIV 冲突避让

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0069-07

Simulation research on traffic organization of quay front and approach bridge of container terminal in Luojing

ZHANG Baiwang¹, ZHANG Bing², TANG Ying¹, LIU Chunze¹, LIU Chengxin¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: After the commissioning phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port (abbreviation: phase I renovation project in Luojing), the traffic congestion at the intersection of the quay front and approach bridge has become a bottleneck restricting the improvement of wharf operational efficiency. To effectively improve this situation, a traffic organization optimization plan is proposed and its optimization effect is verified using system simulation methods. Taking the transportation within the port as the core research object, based on the wharf layout, vehicle driving rules, and traffic flow path planning, a traffic simulation model for the wharf front approach bridges of phase I renovation project in Luojing is constructed. By simulating the operation process of AIV (automated intelligent vehicle) during the peak operation period at the wharf, key indicators such as intersection delay time, quay crane efficiency and utilization rate, and AIV cycle time are statistically analyzed to conduct a quantitative comparative analysis of different traffic organization schemes. The research shows that compared with the current operational scheme of the terminal, the optimized traffic organization scheme demonstrates remarkable effectiveness in reducing traffic conflicts and enhancing the efficiency of quay cranes. Moreover, as the number of AIV deployed increases, the advantages of this optimized scheme become even more prominent, providing strong support for improving the overall operational efficiency of the terminal.

Keywords: container terminal; traffic organization; system simulation; AIV conflict avoidance

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 张佰望(1997—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计与咨询工作。

港口集装箱堆场交通拥堵、自动化码头水平运输效率低等问题成为制约港口发展的瓶颈。为应对这些挑战,众多学者开展了相关研究。尤悦等^[1]基于交通流理论与 VISSIM 仿真软件,对港口集装箱堆场交通流进行研究,并提出改进措施;仲美稣等^[2]、杨勇生等^[3]针对自动化码头的自动导引车(AGV)路径优化问题,提出交通虚拟环岛策略,并利用 eM-Plant 仿真软件进行仿真模拟,以提高码头作业效率;李琳^[4]针对集装箱码头闸口布置及港内交通组织问题,基于 VISSIM 进行仿真与评估,为集装箱码头设计提供决策支撑。此外,Li 等^[5]从效率、经济和环境角度,对自动化码头布局进行了仿真研究;杜晔等^[6]则基于交通大数据,对集装箱码头外集卡作业时间进行预测仿真;温惠英等^[7]基于冲突搜索的双层算法解决码头多 AGV 协同作业产生的冲突问题,缓解道路局部拥堵现象;余明珠等^[8]基于仿真优化思想的启发式算法求得集装箱贝位分配量;田宇等^[9]基于启发式遗传算法建立 AGV 与场桥集成调度的数学模型,并探究更适合其求解的启发式规则;陶辉等^[10]构建码头 AGV 配置优化模型并求解,并通过仿真模拟实验,对模型和算法进行验证。

在港口运营管理领域,已有研究主要聚焦于构建仿真模型或数学模型,并结合优化算法,系统解决码头设备配置、港区交通流组织等核心问题。本文基于前人研究成果,旨在运用仿真方法进一步探讨提升港口运营效率的交通组织策略,上海港罗泾港区一期工程仅通过单座引桥与大码头衔接,项目投运后,引桥与大码头交叉口频繁出现交通拥堵现象。鉴于直接调整 AIV(自动智能车辆,automated intelligent vehicle)路径存在较高的试错成本,且方案对实际交通流量的改善效果尚未可知,为优化码头前沿交通组织,需采取“仿真验证-方案优化-实施部署”的技术路径:首先建立交通仿真模型,对优化方案进行多维度量化评估,重点考察码头运行效率、关键节点交通流畅度等指标的提升幅度,待仿真结果验证有效性后再行部署。

1 系统仿真模型构建

1.1 模型范围

模型范围包含码头前沿、引桥和陆域堆场。AIV 往返于码头前沿和陆域堆场进行装卸船作业。

1.2 模块设计

1.2.1 水平运输车辆模块

AIV 从堆场沿路网到达目标岸桥,在岸桥下进行装卸作业,然后再根据作业任务,沿路网行驶到堆场或者下一岸桥作业,循环往复。AIV 在行驶中还需判断与前车的安全距离,如与前车车距小于安全距离,则 AIV 减速至停车等待。

1.2.2 岸桥装卸模块

岸桥负责进行装卸船作业(从船上卸箱放到 AIV 上,或者从 AIV 取箱装船);作业完成后,为 AIV 分配取/送箱任务,并把目的箱位位置信息传递给 AIV。

1.2.3 堆场装卸模块

模型将该模块简化处理为 AIV 在陆域堆场随机停留一段时间后,上引桥返回码头前沿。

1.2.4 路网模块

路网模块根据码头平面布置的交通组织方案来铺设路网。路网内的每条道路根据主干道、通行车道、等待车道、装卸车道、交叉口等道路类型,分别限制了 AIV 的行驶速度。在交叉口根据 AIV 的目的地信息判断其行驶方向。当 AIV 到达冲突区域时,在车流等待位置判断交通冲突:如果冲突区域内有冲突流向 AIV,则 AIV 在等待位等待,当冲突流向最后一辆 AIV 的车头到达冲突车流结束判断位置时,AIV 可以进入冲突区域;但是相邻车道的 AIV 不能同时转弯,需至少间隔 1 个车身距离。

1.3 评价指标

交通组织优化效果的主要评价指标包括冲突区各流向延误时间和交通量、岸桥作业效率和岸桥利用率、AIV 各作业状态时间,该指标包含 AIV 行驶时间、路上停车等待时间、岸桥下等待时间、岸桥下作业时间、陆域堆场停留时间。

2 工程应用实例

罗泾改造一期工程的 7[#]引桥连接前档、后档、内档码头和陆域堆场, 码头前沿与引桥的车流为 AIV 进行装卸船作业产生的车流。

2.1 交通组织方案和冲突分析

AIV 装卸船车流的主要车流为前档和后档码头与堆场之间的往返车流。还有一部分交通量虽小, 但对交叉口车流冲突影响较大的小股车流, 即 AIV 在岸桥卸车后, 再去其他岸桥装车的车流。

现状方案前档和后档码头与堆场之间往返车辆的行驶路线见图 1。

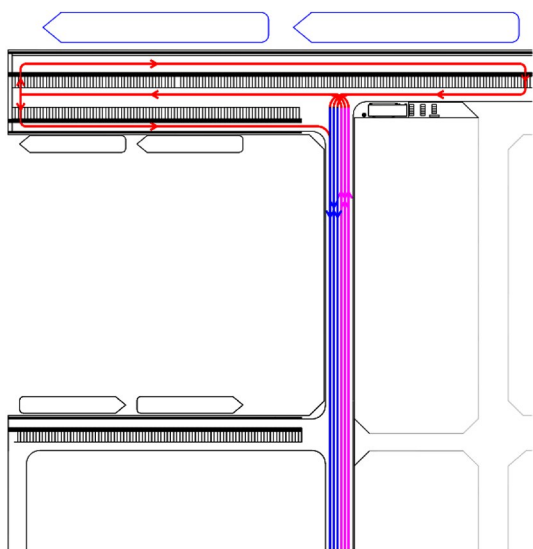


图 1 现状方案主要车流行驶路线
Fig. 1 Main driving routes of vehicle flows under current scheme

现状方案主要交通冲突为 7[#]引桥左转至前档和后档码头左侧车道车流与前档码头右侧左转至 7[#]引桥车流, 并且后档码头岸桥轨下车道右转车流与前档码头右侧左转车流均汇入 7[#]引桥, 也存在一定交通冲突。

基于 AIV 的感知精度与车辆调度系统效能的前档和后档码头与堆场之间车辆往返路径的优化方案见图 2。

优化方案车辆从 7[#]引桥上码头之后的车流行驶路线与现状方案相同, 区别在于 7[#]引桥的车道布置。优化方案从前档码头平台右侧车道左转进

入 7[#]引桥下码头的车流沿 7[#]引桥右侧第 6、7 车道下码头, 而从 7[#]引桥左转进入前档和后档码头平台左侧车道的车流在 7[#]引桥中间第 3、4、5 车道行驶, 后档岸桥轨下车道的车辆右转沿 7[#]引桥左侧第 2 车道下码头。以上 3 股车流均无流线交叉, 缓解了现状方案在此交叉口的交通拥堵。

但为了与堆场道路衔接, 优化方案 7[#]引桥下半段仍为左侧 3 车道下行右侧 3 车道上行, 车辆需在 7[#]引桥与内档码头平台交叉口调顺车流。此处 7[#]引桥上行和下行车流存在流线交叉, 成为优化方案的主要交通冲突。

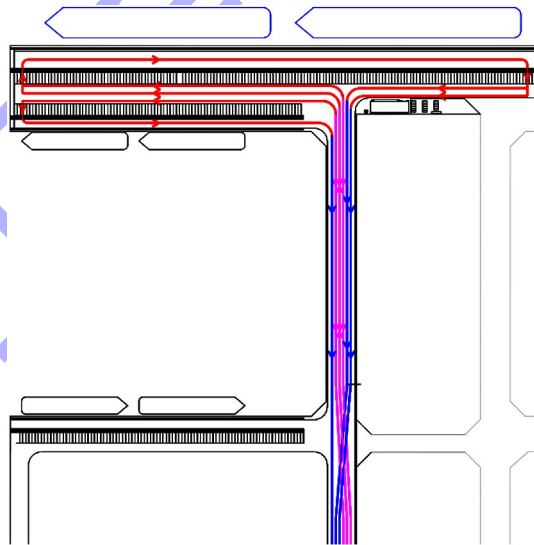


图 2 优化方案主要车流行驶路线
Fig. 2 Main driving routes of vehicle flows under optimized scheme

2.2 试验方案设计

仿真试验模拟了前档码头海侧 7 台岸桥和后档码头 4 台岸桥同时装卸作业的情景, 所有 AIV 均投入装卸船作业。

仿真试验以 AIV 配置数量为试验因子, 按 5 辆步长从 90 辆递增至 140 辆, 共设置 22 组工况 (其中现状方案和优化方案各 11 组)。

2.3 输入条件及基本假设

模型中输入的参数包括岸桥配置数量和作业时间、AIV 在陆域堆场的停留时间、AIV 在不同路段行驶的运行参数等, 输入参数的具体取值根据码头实际生产运营数据获得。

2.4 港内道路布局和交通组织方案分析

交叉口冲突导致的车流延误时间是影响码头运营效率的重要因素。研究重点分析现状方案和优化方案的前档、后档码头与 7[#]引桥和内档码头与 7[#]引桥的交通流量和延误时间。

2.4.1 前档码头交叉口交通分析

前档码头交叉口的冲突车流主要由 7[#]引桥往返前档和后档码头作业的车流产生。配置 140 辆 AIV 时, 现状方案和优化方案在该交叉口的交通延误对比见图 3, 其中双短划线代表 7[#]引桥驶向前档和后档码头作业的车流; 单实线代表前档码头海侧作业完成后驶向堆场、前档和后档码头其他岸桥的车流; 单虚线代表后档码头作业完成后驶向堆场、前档和后档码头其他岸桥的车流。文字分别标注对应流向的每小时交通量和 AIV 平均延误时间。

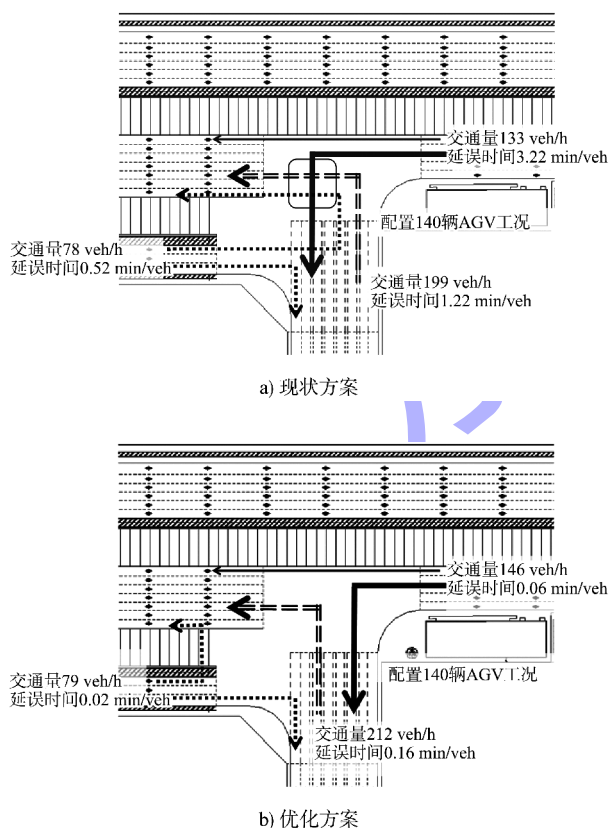


图 3 前档码头与 7[#]引桥交叉口的交通延误

Fig. 3 Traffic delay at intersection between front wharf and No. 7 approach bridge

优化方案使前档码头交叉口综合平均延误时间从现状的 1.74 min 降至 0.10 min, 交通冲突显

著改善。现状延误主要源于两股冲突车流: AIV 从前档码头左转至 7[#]引桥 (平均延误 3.2 min) 与 AIV 从 7[#]引桥左转上码头 (平均延误 1.2 min) 的流线交叉; 而优化方案通过消除该冲突点, 明显减少交通延误, 使残余延误仅由 AIV 相邻车道转弯限制引起, 表明空间资源配置仍存在优化空间。

2.4.2 内档码头交叉口交通分析

内档码头交叉口的冲突车流是由前档和后档码头与内档码头之间往来的小股车流, 以及优化方案中 AIV 调整车道产生的交叉车流。配置 140 辆 AIV 时, 现状方案与优化方案在该交叉口的交通延误对比见图 4。图中文字分别标注对应流向的每小时交通量和 AIV 平均延误时间。

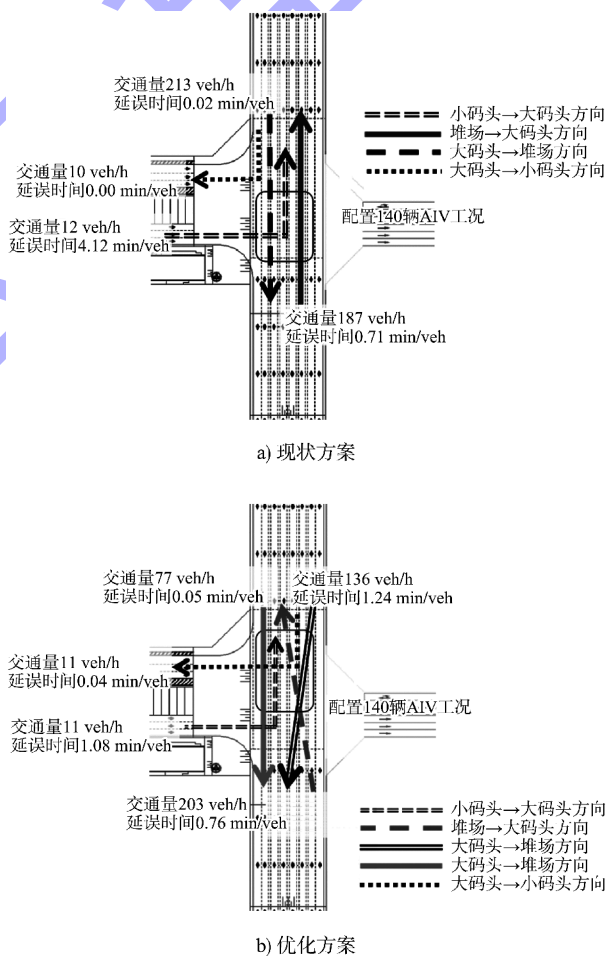


图 4 内档码头与 7[#]引桥交叉口的交通延误

Fig. 4 Traffic delay at intersection between inner wharf and No. 7 approach bridge

优化方案使内档码头交叉口综合平均延误时间从现状的 0.44 min 增至 0.77 min, 增幅约 20 s。

分析显示, 现状方案下往返前档和后档码头与堆场的上行车流因前档和后档码头排队导致平均延误 0.71 min, 而从内档码头左转往前档和后档码头的车流受 7#引桥直行车流影响, 平均延误超过 4 min。优化方案的主要冲突源于 AIV 调整车道产生的流线交叉, 导致 7#引桥下行车流平均延误 1.24 min、上行车流 0.76 min; 但左转车流因仅需穿越 1 条车

道, 平均延误降至 1.08 min, 较现状减少 3.04 min (降幅达 74%), 表明优化方案对该股车流延误改善效果显著。

2.5 岸桥效率分析

为揭示 AIV 配置数量对码头运营效率的影响, 试验通过分析不同配置工况下的岸桥效率, 从整体效率角度对比了现状方案与优化方案, 见图 5。

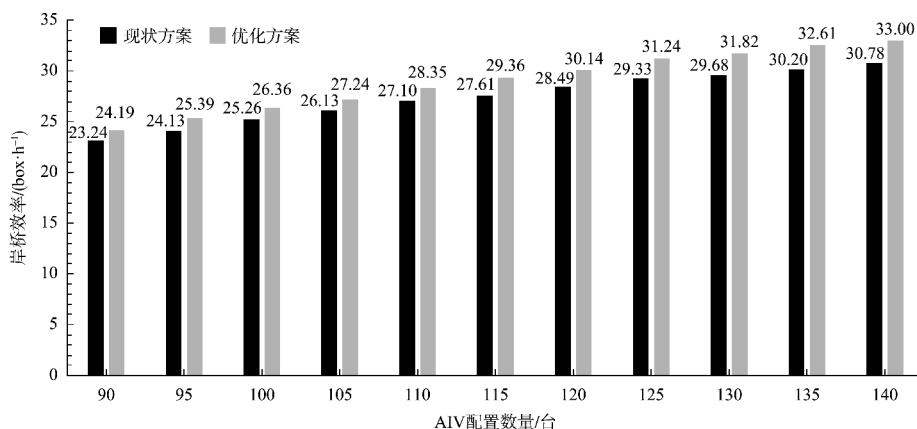


图 5 现状方案和优化方案岸桥效率

Fig. 5 Quay crane efficiency in current and optimized schemes

优化方案在不同 AIV 配置工况下的岸桥效率均大于现状方案。这是由于优化方案通过减少交叉口延误, 重构了 AIV 作业时间分配结构。配置 AIV 的数量越多, 优化方案与现状方案的岸桥效率差值越大: 当配置 90 台 AIV 时, 优化方案岸桥效率较现状提升 0.95 box/h; 配置 140 台 AIV 时, 效率差值扩大至 2.22 box/h。优化方案与现状方案的岸桥效率差异随 AIV 配置数量增加呈非线性扩大趋势: 当配置 90 台 AIV 时, 优化方案较现状方案效率提升 0.95 box/h (提升幅度约 4.1%); 当配置量增至 140 台时, 效率差值扩大至 2.22 box/h (提升幅度约 7.2%)。整体而言, 优化方案可实现 4%~8% 的岸桥作业效率提升, 但边际效益递减规律显著, 即当 AIV 数量超过临界阈值后, 效率增幅逐步趋缓直至停滞。具体而言, 现状方案在 AIV 配置达 173 台时, 岸桥效率达到理论极值 32.19 box/h; 而优化方案需配置 189 台 AIV 方可触及 34.91 box/h 的效率极值。

在码头实际运营时, AIV 设备的配置数量不

能仅以效率最大化为唯一标准, 需要综合考量设备采购成本、码头整体运行效率要求以及实际作业中的动态变化因素, 以实现效率提升与成本控制的动态平衡。

2.6 AIV 状态分析

为识别 AIV 作业瓶颈, 试验分析不同配置工况下 AIV 的平均循环时间及在各作业环节所消耗的时间, 见图 6。

优化方案在不同 AIV 配置工况下的循环时间均短于现状方案。优化方案通过减少交叉口延误显著提升岸桥效率, 在不同 AIV 配置下均展现循环时间优势: 当配置 90 台 AIV 时, 停车等待和移动时间较现状分别减少 0.65 和 0.94 min; 配置 140 台时, 分别减少 2.70 min 和 0.33 min。虽岸桥下等待作业时间因 AIV 周转加快略有增加, 但随 AIV 数量增多(90 台增至 140 台), 优化方案循环时间优势从 1.70 min 扩大至 2.01 min, 表明通过提升 AIV 周转效率, 有效平衡了作业环节的时间分配。

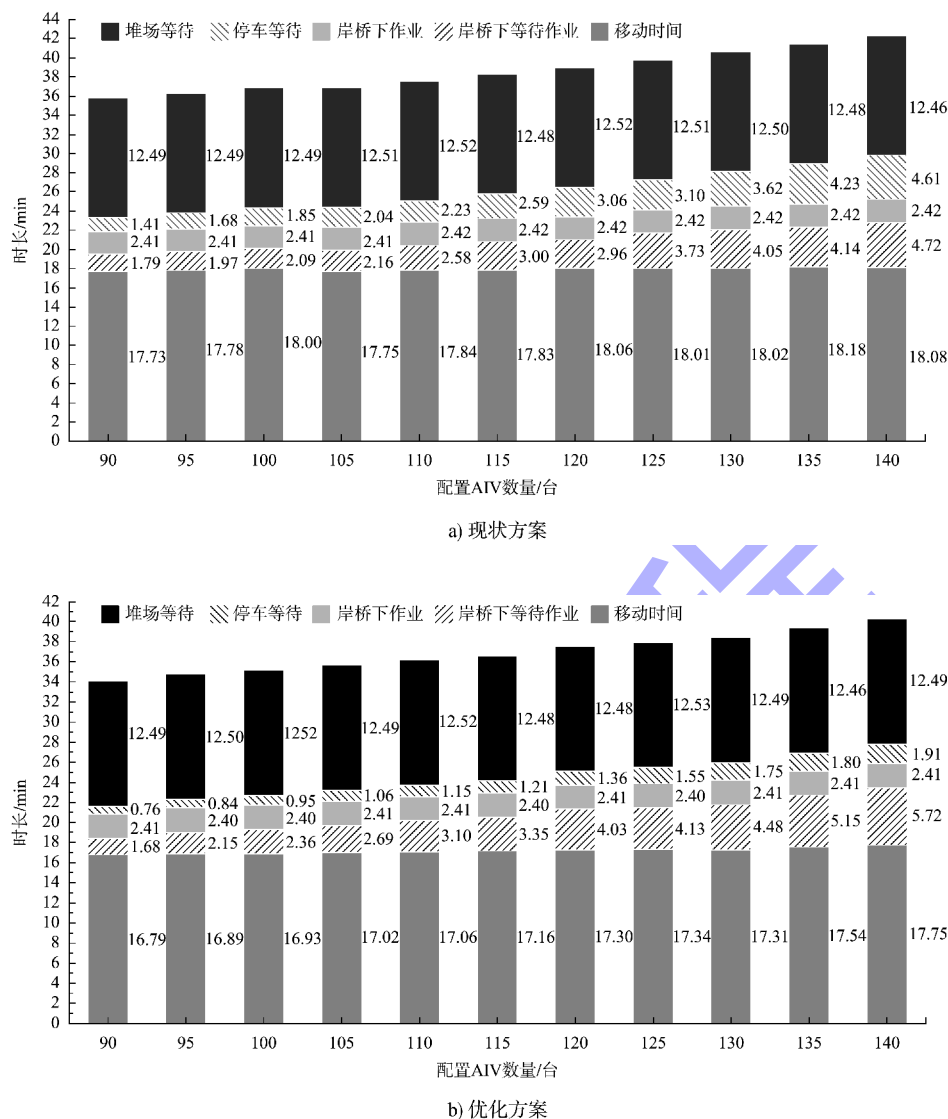


图6 AIV作业状态统计结果

Fig. 6 Statistical results of AIV operation status

3 结语

1) 优化方案通过重构车道功能分区, 显著减少了主交叉口的交通延误, 缩短 AIV 循环时间, 进而提升了岸桥效率。

2) AIV 配置数量的增加在一定范围内对岸桥效率有促进作用, 但当配置数量达到一定规模后, 其对岸桥效率的提升作用逐渐减弱, 表明单纯运力投入存在边际效应递减规律。

3) 研究不仅为罗泾改造一期工程的交通组织优化提供了科学依据, 也为同类自动化集装箱码头的交通组织提供了理论支撑与实践参考。

参考文献:

- [1] 尤悦, 何红弟. 基于 VISSIM 仿真的港口集装箱堆场交通流研究[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(11): 61-65, 93.
YOU Y, HE H D. Traffic flow of port container yard based on VISSIM simulation [J]. Computer applications and software, 2018, 35(11): 61-65, 93.
- [2] 仲美稣, 杨勇生. 卸船作业模式下自动化码头 AGV 路径仿真优化[J]. 水运工程, 2018(4): 122-127.
ZHONG M S, YANG Y S. Based on discharging operation mode automation terminal of AGV path simulation optimization[J]. Port & waterway engineering, 2018(4): 122-127.
- [3] 杨勇生, 王楠楠, 梁承姬, 等. 基于环岛策略的自动化码

头 AGV 路径仿真优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 240-246.

YANG Y S, WANG N N, LIANG C J, et al. Simulation and optimization of AGV path in the automated container terminal based on the traffic circle[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(1): 240-246.

[4] 李琳. 盐田港东作业区集装箱码头闸口及港内交通仿真与评估[J]. 水运工程, 2025(3): 228-236, 288.

LI L. Simulation and evaluation for container terminal gate and port traffic in east operation area of Yantian Port[J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 228-236, 288.

[5] LI X D, PENG Y, HUANG J, et al. Simulation study on terminal layout in automated container terminals from efficiency, economic and environment perspectives [J]. Ocean & coastal management, 2021, 213: 105882.

[6] DU Y, ZHAO Y F, GAO D Y. Predictive simulation of external truck operation time in a container terminal based on traffic big data [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (science), 2024, 29(5): 801-808.

[7] 温惠英, 元昱青, 林译峰. 考虑道路负载均衡的码头多 AGV 无冲突路径规划[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 1-10.

WEN H Y, YUAN Y Q, LIN Y F. Conflict-free path planning for multi-AGVs in automated terminals considering road load balancing [J]. Journal of South China University of Technology (natural science), 2023, 51(10): 1-10.

[8] 余明珠, 梁卓斌, 金波. 基于仿真优化的自动化集装箱码头出口箱位分配[J]. 运筹与管理, 2023, 32(5): 181-189.

YU M Z, LIANG Z B, JIN B. Storage space allocation for outbound containers in automated container terminals using simulation-based optimization [J]. Operations research and management science, 2023, 32(5): 181-189.

[9] 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.

TIAN Y, ZHOU Q, ZHU B F. Integrated scheduling of dual-cycle AGV and yard crane at automated container terminal [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2020, 20(4): 216-223, 243.

[10] 陶辉, 陈宁. 自动化集装箱码头 AGV 配置仿真分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(4): 694-698.

TAO H, CHEN N. Simulation analysis of AGV configuration in automated container terminal [J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2021, 45(4): 694-698.

(本文编辑 赵娟)

• 消 息 •

上海小洋山北作业区工作船码头项目通过交工验收

2025 年 10 月 11—20 日, 三航局承建的上海小洋山北作业区工作船码头项目通过交工验收。该项目位于上海市洋山深水港区小洋山北集装箱码头西侧, 主要建设内容包括砂桩地基加固、桶式基础安装、护底抛石及上部结构工程。该项目的开港运营, 将有效加快推进小洋山北区域合作发展和综合开发, 提升上海国际航运中心功能地位和我国国际航运竞争力。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202511/t20251125_223992.html (2025-10-30)