



引桥式、高水水中转比条件下全自动化 集装箱码头堆场布局适应性分析

龙友¹, 陈迪茂²

(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: 在全球港口智能化转型与“双碳”目标双重驱动下, 全自动化集装箱码头已成为港口升级的核心方向。由于自动化集装箱码头自身特点不同, 尤其是在引桥式码头结构(如上海外高桥港区、宁波舟山港)、高水水中转比例(如广州南沙四期)、码头水域条件复杂(如长江内河码头)或者改造码头等情况下, 传统的堆场作业线垂直码头岸线布置的自动化布置模式不能较好地适应。通过分析垂直布置端装卸模式自动化码头对于引桥式、高水水中转比条件下在交通组织、作业效率等方面存在的问题, 从码头岸线利用及水域布置、堆场布置、交通组织等方面提出适合引桥式布置、高水水中转比例条件下集装箱码头的堆场布局模式, 可为同类全自动化集装箱码头的设计提供借鉴。

关键词: 引桥式布置; 高水水中转比; 全自动化集装箱码头; 堆场布局

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0049-06

Overall layout adaptability analysis of fully automated container terminal with approach bridge and high waterway-waterway transit ratio

LONG You¹, CHEN Dimao²

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

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

Abstract: Driven by the global intelligent transformation of ports and the dual carbon goals, fully automated container terminals have become the core direction for port upgrading. In view of the different characteristics of automated container terminals themselves, especially in the approach bridge type terminal structure (such as Shanghai Waigaoqiao port area and Ningbo-Zhoushan Port), the high waterway-waterway transit ratio (such as the fourth phase of Guangzhou Nansha), as well as the complex water conditions of the terminal (such as inland river terminal in the Yangtze River) or in the case of renovated terminals, the traditional layout mode of automated container terminals with the container yard operation lines perpendicular to the shoreline cannot be well adapted. By analyzing the existing problems in the vertical layout and end loading and unloading mode automated terminals in terms of traffic organization and operational efficiency when dealing with the conditions of approach bridge and high waterway-waterway transit ratio, this paper proposes a suitable container terminal yard layout mode for approach bridge layout and waterway-waterway transit ratio conditions from the aspects of terminal shoreline utilization and water area layout, yard layout, and traffic organization, which can provide reference for the design of similar fully automated container terminals.

Keywords: approach bridge layout; high waterway-waterway transit ratio; fully automated container terminal; yard layout

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 龙友(1979—), 男, 高级工程师, 从事港口工程装卸工艺设计工作。

自 20 世纪 80 年代中期起, 自动化集装箱码头在劳动力成本昂贵的欧洲地区首先受到关注, 从 1993 年全球第 1 座全自动化集装箱码头——荷兰鹿特丹港 ECT Delta 建成投产至今, 自动化集装箱

码头已历经 30 余年的发展^[1], 全球已建和在建的全自动化集装箱码头中近 50 座均为近岸满堂式布置形式^[2], 新建(非改造)的全自动化码头 80% 以上采用堆场作业线垂直码头岸线的布置形式^[3], 见表 1。

表 1 国内外主要全自动化码头布置模式
Tab. 1 Arrangement mode of major fully automated terminals at home and abroad

码头名称	码头布置形式	堆场布置形式	堆场设备	水平运输设备
荷兰鹿特丹港 ECT Delta	满堂式	垂直码头	ARMG	AGV
荷兰鹿特丹港 ECT Euromax	满堂式	垂直码头	ARMG	AGV
荷兰鹿特丹港 APMT MVII	满堂式	垂直码头	ARMG	L-AGV
德国汉堡港 HHLA CTA	满堂式	垂直码头	ARMG	AGV
日本名古屋 Tobishima TCB	满堂式	平行码头	ARTG	AGV
美国长滩 LBCT	满堂式	垂直码头	ARMG	AGV
中国厦门远海码头(改造)	满堂式	平行码头	ARMG	AGV+伴侣
中国青岛前湾自动化码头	满堂式	垂直码头	ARMG	L-AGV
中国上海洋山四期码头	满堂式	垂直码头	ARMG	L-AGV
中国广州南沙四期码头	满堂式	平行码头	ARMG	IGV
中国日照石臼三期改造工程(改造)	满堂式	平行码头	ARMG	ICT
中国天津港北疆 C 段码头(改造)	满堂式	平行码头	ARMG	ICT
中国深圳海星码头(改造)	满堂式	平行码头	ARMG	ICT
中国钦州大榄坪自动化码头	满堂式	垂直码头	ARMG	IGV

注: ARMG 为 automated rail mounted gantry crane, 即自动化轨道式集装箱龙门起重机; AGV 为 automated guided vehicle, 即自动导向运输车; L-AGV 为 lifted AGV, 即提升式自动导引运输车; ARTG 为 automated rubber tyred gantry crane, 即自动化轮胎式集装箱龙门起重机; IGV 为 intelligent guided vehicle, 即智慧型引导运输车; ICT 为 information container truck, 即智能型集卡。

1 传统自动化码头堆场布置模式存在问题

在堆场作业线垂直码头岸线的传统自动化码头布置形式中, 通常每条堆场作业线配置 2 台高速 ARMG, 分别负责海、陆两侧内外水平运输设备的交接箱作业^[4-5], 水路集装箱通过 ARMG 接力的形式实现进出堆场, 见图 1。

垂直布置模式主要存在以下问题: 1) 堆场设备投资高。为了使 ARMG 与岸桥的作业效率相匹配, 需要按照一定的比例建设堆场作业线数量(通常为岸桥数量的 2~3 倍), 且每条作业线配置 2 台 ARMG, 导致堆场设备投资较大。2) 堆场设备作业效率难以充分发挥。每台 ARMG 仅能服务 1 条箱区, 无法跨区共享, 且分别服务于海、陆两侧。另外, 由于箱位分散, 倒箱距离延长, 导致设备翻箱率增加 30% 左右, 影响 ARMG 作业效率的发挥。3) 能源消耗与碳排放增加。ARMG 采用带箱高速运行模式, 大车运行速度高, 装机容量大,

且翻箱率高, 导致堆场设备能耗大, 碳排放增加。

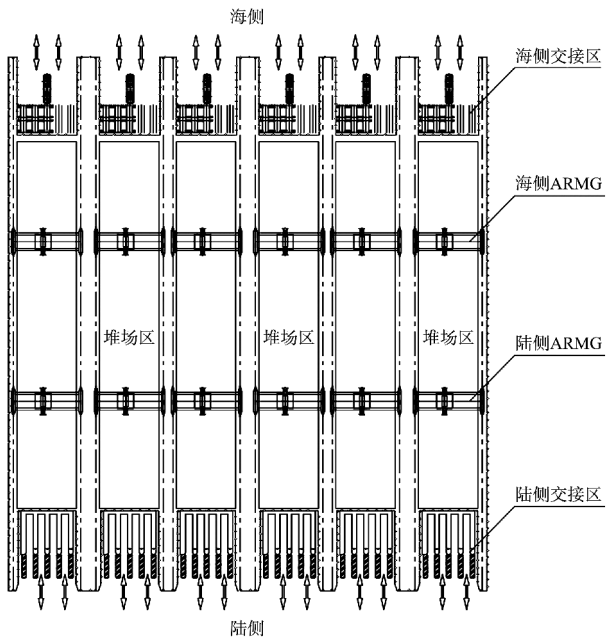


图 1 堆场垂直岸线布置形式
Fig. 1 Layout form of storage yard perpendicular to shoreline

对于水水中转比例较小的腹地经济型的码头，堆场垂直布置方式海、陆两侧 ARMG 在设备利用率上较为平衡，可充分发挥两侧 ARMG 的能力，但如果水水中转比例较大，从船上卸下的集装箱由海侧 ARMG 卸至堆场短暂堆存后，仅能由海侧 ARMG 取箱后装船，在此过程中，陆侧 ARMG 处于闲置状态，造成海、陆两侧 ARMG 作业的严重不平衡，从而难以发挥 1 条作业线上 2 台 ARMG 的效率，因此，对于水水中转比例较高的全自动

化码头，堆场垂直布置模式存在一定的不合理性。

2 堆场布置模式适应性分析

2.1 国内外自动化码头堆场布置模式现状及特点

目前，国内外已建和在建的自动化集装箱码头堆场布置模式可归为两大类，即场桥轨道端装卸的自动化集装箱码头和场桥轨（跑）道边装卸的自动化集装箱码头^[6-7]，其典型布置特点和系统构成见表 2。

表 2 自动化集装箱码头堆场布置模式类别
Tab. 2 Classification of automated container terminal yard layout modes

类型	典型布置形态	设备方案	自动化系统	备注
端装卸的自动化集装箱码头	堆场通常垂直岸线布置，堆场封闭、集卡、AGV 等水平运输设备不进入堆场，水平运输设备与堆场设备在场桥端部完成交接，堆场全面实现流程智能化+设备自动化	1)装卸船：双 20 ft/双 40 ft/双小车岸桥； 2)堆场：轨道场桥 ARMG/自动化跨运车（auto straddle） 3)水平运输：AGV/L-AGV/穿梭车（shuttle）/自动化穿梭车（auto shuttle）等	1)岸桥推荐远程操控； 2)堆场、海侧水平运输推荐采用自动化设备； 3)采用自动化 TOS（terminal operation system，码头操作系统），实现自动调度； 4) TOS 通过 ECS（equipment control system，设备控制管理系统）与岸桥、场桥、水平运输设备单机系统实现信息传输与集成	堆场也有采用平行布置方式，通常受地块限制或为改造工程，作业原理与端装卸类型一致，如厦门远海码头
大机遥控	堆场通常平行岸线布置，堆场不封闭，集卡等人工作业设备进入堆场，岸桥、场桥等大机设备实现远程控制	1)装卸船：双 20 ft 单小车岸桥； 2)堆场：轨道场桥 RMG/轮胎场桥 E-RTG（electric rubber-tyred gantry crane，电力轮胎式集装箱龙门起重机）； 3)水平运输：集卡	1)岸桥推荐采用远程操控； 2)轨道/轮胎场桥推荐采用远程操控； 3)集卡引导	-
边装卸的自动化集装箱码头	在大机遥控基础上增加箱条封闭，堆场实现智能调度和自动理箱，堆场部分实现流程智能化+设备自动化	同大机遥控方案	TOS 提供智能调度系统，从堆场堆存策略制定、堆区自动理箱作业到集卡和场桥在线实时跟踪监控、任务动态分配，努力实现生产资源均衡、持续、充分利用	-
自动化	在堆场智能调度基础上，海侧内集卡采用自动驾驶技术，海侧装卸船实现流程智能化+设备自动化	海侧水平运输采用自动驾驶内集卡，其他同上。需整体提升堆场作业和车辆运行安全措施	大幅提升堆场跟踪、定位、实施监控水平，TOS、ECS 系统更进一步实现对无人内卡系统的智能运行调度和管理	-

端装卸的自动化集装箱码头可细分为两类：即水平运输采用 AGV 的码头以及水平运输采用 shuttle/auto shuttle（简称 SH/ASH）的码头。该两类码头虽然水平运输设备不同，但总体布局、作业流程是基本相似的。采用 SH 作业的码头，水平运输环节人工作业的介入降低了码头的自动化作业水平，从发展看，最终将被 ASH 作业的码头替代。

端装卸的自动化码头是目前使用最为广泛、技术最为成熟的全自动化集装箱码头解决方案，

堆场作业线通常垂直码头岸线布置，以荷兰鹿特丹 ECT Delta、荷兰鹿特丹 ECT Euromax、德国汉堡港 HHLA CTA、美国长滩 LBCT 以及国内青岛前湾自动化、上海洋山四期等码头^[8]为代表。其码头装卸系统配置规范，自动化界面清晰、自动化作业链条长、自动化程度高，作业过程全程掌控、过程透明，自动化区封闭作业、安全性强；但端装卸的自动化码头也有其缺陷和不足，如建设和运营灵活度较弱、初期投入高、能耗偏大、建设周期长、技术难度较大等。端装卸模式典型交通流线见图 2。

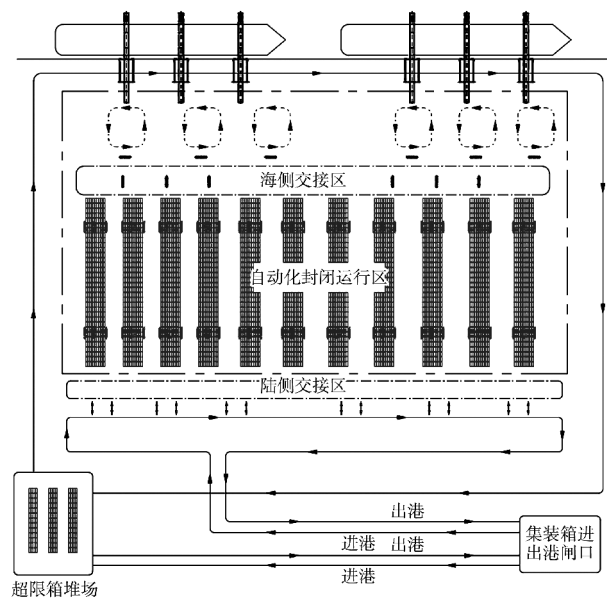


图 2 端装卸的自动化码头典型交通流线

Fig. 2 Typical traffic flow of automated terminal with end loading and unloading

与端装卸相对应的边装卸自动化码头模式，堆场通常平行于码头岸线，更接近于传统常规布置，以日本名古屋 Tobishima TCB、广州南沙四期码头^[9]、日照石臼三期改造工程、天津港北疆 C 段

码头、深圳海星码头等为代表。其采用轻型水平运输设备多走+重型堆场设备少走的模式，堆场设备可同时面向海、陆侧作业，作业均衡，大大降低了堆场设备投资及作业能耗。该模式投资规模可控，减员和改善工人作业环境效果明显，作业模式与常规码头模式较为接近。此外，该模式还便于分步实施，远控、智能调度、自动驾驶，不断发展进步，利于作业转换。边装卸模式典型交通流线见图 3。

两种作业模式特点对比见表 3。

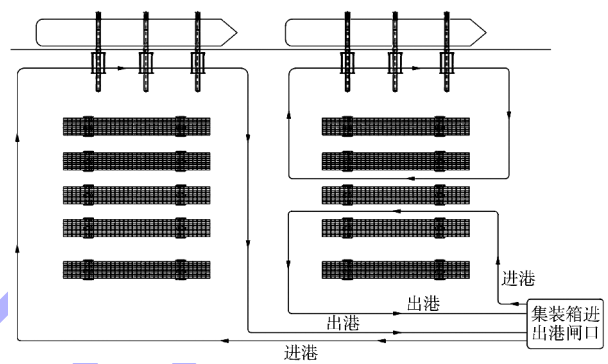


图 3 边装卸自动化码头典型交通流线

Fig. 3 Typical traffic flow of automated terminal with side loading and unloading

表 3 两种典型自动化码头作业模式对比
Tab. 3 Comparison of two typical automated terminal operation modes

模式	堆场布置	堆场设备	水平运输设备	装卸方式	作业通道	内外集卡作业
端装卸自动化码头	垂直布置	ARMG,箱区采用双机配置	AGV,SH/ASH	端部装卸,少量悬臂 ARMG 可侧面装卸作业	两侧端部设置交接区	前、后车流自然分离
边装卸自动化码头	平行布置	ARMG/ARTG 可根据箱区长度及作业量单机或双机配置	集卡(人工驾驶或无人驾驶)、AIV 或 IGV	侧面装卸(跨内或悬臂下)	跨内或悬臂下设作业通道	经向路及作业通道内外车辆混行或物理隔离,若作业通道区分内外,集卡通道可分离
模式	作业模式	水平运输距离	箱区长度	生产作业能耗	堆场设备调度	
端装卸自动化码头	水平运输设备定点取送箱, ARMG 大机行走堆取运箱, 前后端 ARMG 多数箱需接力作业,增加操作量	衔接码头与堆场作业, 缩短箱区到码头前沿运输距离、简化行驶路径	不宜过长,避免 ARMG 走行距离过长,影响作业效率	大机带箱运行, 能耗较大	堆场设备限定在本箱条内	
边装卸自动化码头	水平运输设备行走, ARMG/ ARTG 定点堆取箱	内集卡在泊位与箱区间走环形循环路线	与泊位及主流船型长度一致时,可有效减少水平运输迂回绕行距离	大机定点堆取箱,能耗较小	多泊位间轨道连通, 需要时设备可在相邻箱条内调度	
模式	堆场设备数量	堆场设备投资	空重箱堆存	堆场扩建	对中转比例的适应性	
端装卸自动化码头	每条箱条独立,至少需 2 台设备, 有明显的海陆侧作业分工,由于陆侧设备难于兼顾海侧高峰作业,通常设备数量会有较大冗余	设备数量多,投资较高	空重混堆	受端部作业方式限制,自动化堆场延伸扩展困难	较差,中转比例大将导致海陆侧场桥利用不均,海侧利用率高,陆侧低	
边装卸自动化码头	设备无海陆侧作业分工,均可面向海陆侧作业,且箱区间调度灵活,通常设备配置冗余较小	设备数量相对较少,可根据吞吐量增长分期购置,投资较低	一般空重分离,可提高堆场利用率,降低设备投资,也可空重混堆	可根据生产需要增加箱区数量,扩建自动化堆场	较好,场桥无海陆侧之分,均可服务于内、外集卡,设备利用率均衡	

除上述两大类外, 另一类细分的自动化集装箱码头, 即 auto straddle 自动化码头, 主要应用于欧洲、澳洲, 水平运输设备 auto straddle 兼顾堆场堆取箱作业, 由于堆场堆箱容量较小, 并不适用于人多地少、追求高通过能力的亚洲地区使用。

从装卸作业模式的区别上, 自动化码头自动化作业水平的高低很大程度上取决于可实现自动化作业的“作业链条长度”。端装卸的自动化集装箱码头, 由于其海侧水平运输采用 AGV 等自动化设备, 可以形成岸桥→水平运输→堆场作业的完整的自动化作业链, 海侧通过岸桥 OCR (optical character recognition, 光学字符识别) 等自动识别技术、陆侧通过轨道场桥与外集卡定点获取信息, 整个自动化作业系统界面清晰、内部作业极少受到外部干扰, 形成了长链条的自动化作业封闭区间, 为高水平实现自动化作业创造了条件。相对而言, 边装卸的自动化码头, 由于水平运输环节实现无人自动化难度较大, 实现岸桥与场桥之间长链条的自动化作业链具有一定挑战, 正是为了有效延长边装卸自动化码头的自动化作业链, 各港均将海侧内卡引入自动驾驶技术作为当前努力突破的重点方向。

2.2 引桥式自动化码头堆场作业线布置模式的选择

对于码头采用引桥式布置的自动化集装箱码头, 如上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程^[10], 船岸作业和堆场作业之间通过一定数量的引桥相连, 水平运输必须从特定的引桥位置上下码头才能实现码头与堆场之间的衔接。交通组织的顺畅直接影响整个自动化作业链作业效率的发挥。

针对堆场作业线垂直码头岸线布置的端装卸模式, 见图 4a), 1[#]、2[#]引桥之间码头至堆场的内集卡车流沿逆时针方向行驶, 两引桥之间对应的堆场作业线①~⑩进出海侧交接区的车流在横一路与主车流将产生密集的交叉干扰, 严重影响横一路主车流的运行通畅, 从而影响整个自动化作业线的作业效率。

对于堆场作业线平行码头岸线布置的边装卸模式, 见图 4b), 1[#]、2[#]引桥之间码头至堆场的内集卡车流沿逆时针方向行驶, 两引桥之间对应的堆场作业线①~⑥进出堆场的车流分散在纵一路和纵二路, 相对于端装卸模式, 车流较为分散, 相互干扰少, 车流较端装卸模式有较大的改善, 可有效提高作业线作业效率。

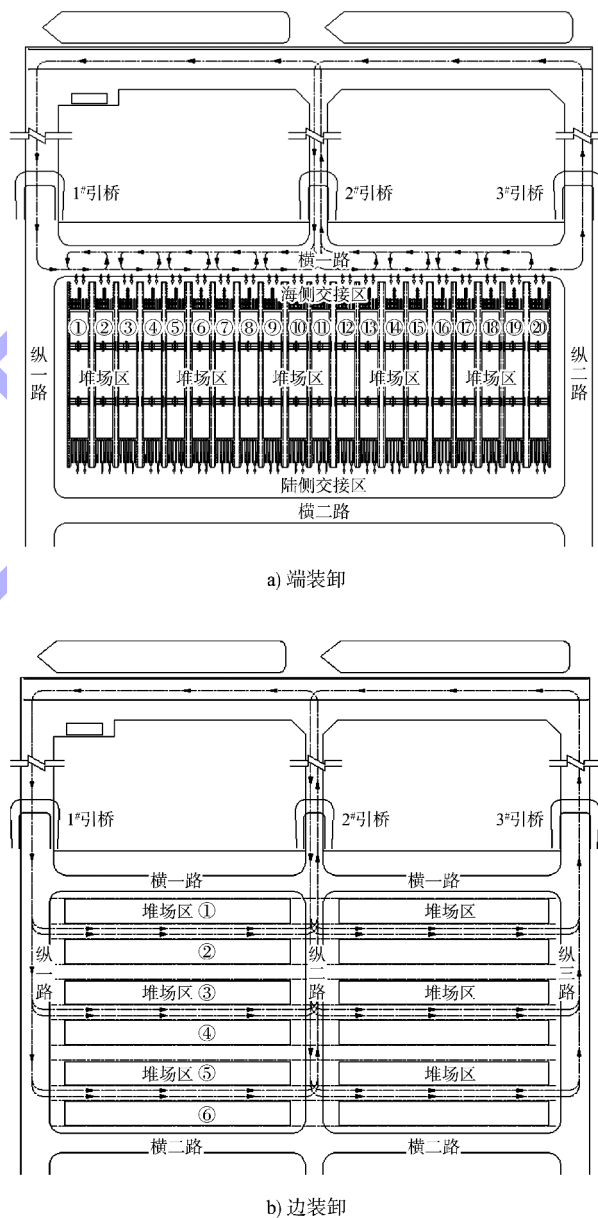


图 4 引桥式自动化码头车流组织

Fig. 4 Traffic organization of approach bridge type automated terminal

综合以上分析, 结合表 3 中两种典型自动化码头作业模式对比分析, 对于引桥式布置模式、

高水水中转比例时的自动化集装箱码头,堆场作业线采用平行码头岸线布置时优点较为突出。

3 结语

1) 当集装箱码头水水中转比例较高时,由于堆场作业线垂直码头岸线的端装卸布置模式海、陆两侧 ARMG 作业不平衡,不能很好地发挥所有 ARMG 的作业效率,需要增加带悬臂 ARMG 箱区作为专用中转箱区或采用堆场作业线平行码头岸线的边装卸布置模式。

2) 对于引桥式布置模式的自动化码头,考虑交通组织对作业效率的影响,应优先选用堆场作业线平行码头岸线布置的边装卸模式。

3) 上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程码头采用引桥式布置模式、水水中转比例达 64%,堆场作业线采用了平行码头岸线的边装卸布置模式。

参考文献:

- [1] 郑见粹,李海波,谢文宁,等.自动化集装箱码头装卸工艺系统比较研究[J].水运科学研究,2011,24(2):26-33.
ZHENG J C, LI H B, XIE W N, et al. A study on automation for container terminal operation systems[J]. Research on waterborne transportation, 2011, 24(2): 26-33.
- [2] 王烽,麦宇雄,许鸿贯,等.自动化集装箱码头总体技术路线的选择[J].水运工程,2022(10):8-12.
WANG F, MAI Y X, XU H G, et al. Selection of overall technical route for automated container terminal[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 8-12.
- [3] 高鹏,刘全兴.自动化集装箱码头解决方案与布置特点[J].水运工程,2022(9):35-40,127.
GAO P, LIU Q X. Solutions for automatic container terminals and their layout characteristics[J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 35-40, 127.
- [4] 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.
- [5] 张立斌,王沈元,林奎,等.集装箱码头自动化堆场布置及设备方案选择[J].水运工程,2021(10):148-154.
ZHANG L B, WANG S Y, LIN K, et al. Layout and equipment scheme selection of automated yard in container terminal[J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 148-154.
- [6] 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.
Design code of automated container terminal: JTS/T 174-2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [7] 自动化集装箱码头建设指南:JTS/T 199—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
Guidelines for the construction of automated container terminal: JTS/T 199-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [8] 刘广红,程泽坤,罗勋杰,等.洋山四期工程全自动化集装箱码头总体布置[J].水运工程,2016(9):46-51.
LIU G H, CHENG Z K, LUO X J, et al. General layout of fully automated container terminal in phase IV of Yangshan project[J]. Port & waterway engineering, 2016(9): 46-51.
- [9] 黄炳林,丘耀桦.广州港南沙港区四期工程平面布置要点[J].水运工程,2022(10):53-58.
HUANG B L, QIU Y H. Key points of general layout for Phase IV project of Nansha Port Area in Guangzhou Port[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 53-58.
- [10] 中交水运规划设计院有限公司.上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程初步设计[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2022.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.

(本文编辑 王传瑜)