



# 集装箱码头自动化堆场布置及设备方案选择

张立斌<sup>1</sup>, 王沈元<sup>2</sup>, 林 奎<sup>1</sup>, 苏君利<sup>1</sup>, 刘春泽<sup>1</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中远海运港口有限公司, 上海 200080)

**摘要:** 随着自动化集装箱码头的迅速发展, 形成了多种集装箱码头自动化解决方案。堆场作业是码头装卸工艺系统的关键环节, 因此堆场的布置形式、与水平运输设备的匹配衔接方式以及堆场作业设备的选型、规格及数量确定等是核心研究内容。依托秘鲁钱凯项目, 采用多方案定性、定量比选, 同时借助模拟仿真验证优化的方式, 提出一种集装箱码头自动化堆场装卸工艺方案, 既考虑了工程特点, 满足高峰生产作业段和全年作业的能力和效率需求, 同时还为进一步提升自动化作业水平留有余地。该项目的研究分析思路和确定各项设计参数的方法可为其他类似项目的设计提供参考。

**关键词:** 集装箱码头; 自动化堆场; 装卸工艺; 自动化轨道式场桥(ARMG); 仿真

中图分类号: U 656. 1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0148-07

## Layout and equipment scheme selection of automated yard in container terminal

ZHANG Li-bin<sup>1</sup>, WANG Shen-yuan<sup>2</sup>, LIN Kui<sup>1</sup>, SU Jun-li<sup>1</sup>, LIU Chun-ze<sup>1</sup>

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2.COSCO Shipping Ports Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

**Abstract:** With the rapid development of automated container terminals, many types of container terminal automation solutions are developed. The yard operation is the key link of the terminal handling technology system. Therefore, the yard layout, the supporting transfer mode with the horizontal transport equipment, as well as the selection and determination of specifications and quantity of operating equipment in the yard are core contents to be researched. Based on the Chancay project in Peru and successful experience of relevant cases, after comparison and selection of several schemes, and also optimization based on comparison and verification by means of simulation, an automatic container terminal yard handling technology scheme is proposed, which not only considers the specific characteristics of the project to fully meet the capacity and efficiency requirements of peak production periods and year-round operations, but also leaves rooms for further improvement of the automation operation level. Moreover, the research and analysis ideas of the project and the methods for determining the design parameters can provide reference for the design of other similar projects.

**Keywords:** automated terminal; container yard; handling technology; ARMG; simulation

20世纪80年代中期, 欧洲和日本港口率先尝试建设自动化集装箱码头。世界上第一个自动化码头于1993年在荷兰鹿特丹港的ECT码头投入运行, 截至目前已建成30多个, 主要集中在欧洲国家、美国、澳大利亚、中国等地。

目前, 自动化集装箱码头的模式呈多元化发展, 可以分为全自动化和半自动化码头等。

原主流的全自动化集装箱码头基本形成了典型的装卸工艺方案, 即堆场垂直码头布置, 采用岸桥负责码头作业, 自动导引运输车(automated

guided vehicle, AGV) 或跨运穿梭车 (shuttle carrier, SHC) 负责水平运输, 箱区配备 2 台自动化轨道式场桥 (rail-mounted gantry crane, ARMG) 分别负责堆场海陆侧的作业。

半自动化码头堆场平行码头布置的形式近年来得到广泛发展; 部分半自动化码头通过引入无人集卡、AGV 等承担水平运输, 正在探索另一条全自动化码头的实施方案。

秘鲁钱凯港一期工程项目是中企在南美投资的大型集装箱码头, 在保证生产工艺系统可靠性、先进性的前提下, 需要解决当地缺少技术工人、生产效率较低, 以及人工成本持续走高等问题, 所以采用自动化作业模式十分必要, 但须进一步结合秘鲁当地港口总体发展情况, 并控制工程总投资。探寻适宜的集装箱码头自动化解决方案是本工程设计的一项重点任务, 也是本文研究的主题。

## 1 工程概况

秘鲁钱凯港一期工程位于秘鲁首都利马以北约 78 km 的钱凯湾, 地理位置优越, 拥有良好的自然水深, 紧临泛美公路, 陆运交通发达, 将建成以集装箱、散杂货和滚装为主的现代化港区。工程共建设 4 个货运泊位, 本文主要研究 3、4 号集装箱码头的装卸工艺布置及作业系统<sup>[1]</sup>。

集装箱码头岸线总长 860 m, 吞吐量初期为 100 万 TEU/a, 最终规模达到 150 万 TEU/a; 设计船型近期最大为 1.0 万 TEU 船型, 远期为 1.8 万 TEU 船型, 最小船型均为 1 050 TEU 集装箱船型; 泊位年作业时间为 320~335 d。集装箱主要设计参数见表 1。

表 1 集装箱主要设计参数

箱类	数量占有率/%	平均堆存期/d	堆高/层	标准箱折算系数	水水中转比例/%
普通重箱	62	5(7)	5	1.57	
超限箱	1	5(7)	2	1.57	
危险品箱	2	3(7)	3	1.57	10
冷藏箱	5	5(7)	4	2.00	
空箱	30	10(20)	5/7	1.57	

注: 1. 括号内为水水中转箱数据; 2. 独立空箱区 (为船公司长期空箱堆存设立) 为设计过程中根据优化建议增加。

设计须充分考虑当地集装箱发展现状, 并吸收中国集装箱码头先进技术, 达到中国运营方的总体需求, 确定符合工程实际的集装箱装卸工艺方案。本工程陆域特点是码头长度 860 m, 陆域可用宽度约 940 m, 因此陆域布置不能直接选择对应泊位数量划分堆场区块, 同时陆域纵深受开山影响, 右上侧堆场局部纵深受限, 对堆场设备的轨距模数产生影响。

## 2 方案总体定位

### 2.1 自动化总体方式的选择

#### 2.1.1 常规全自动化码头堆场装卸工艺方案

常规全自动化码头堆场通常垂直码头布置, 目的是提高水平运输和堆场设备作业效率, 便于岸桥后轨至整个堆场区达到无人自动化的要求<sup>[2-3]</sup>。

ARMG 是自动化码头堆场采用最多的设备类型。ARMG 大车速度较高, 为减小质量, 并减少 AGV 走行距离, 主要采用无悬臂形式, 绝大多数自动化集装箱箱区布置 2 台共轨的无悬臂 ARMG, 分别负责海、陆侧集装箱的堆取作业<sup>[4]</sup>。典型自动化集装箱码头布置见图 1。

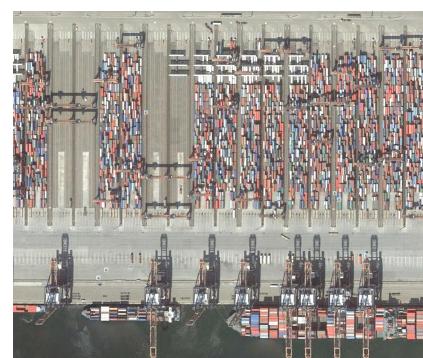


图 1 典型自动化集装箱码头布置

#### 2.1.2 半自动化码头堆场装卸工艺方案

常规集装箱码头通常采用轮胎式场桥 (rubber-tyred gantry crane, RTG) 或轨道式场桥 (rail-mounted gantry crane, RMG) 平行码头岸线布置的方案, 大机负责装卸, 集卡深入到箱区内。

已有的半自动化码头仅将 RMG 提升为自动控

制或远程控制的 ARMG，并逐步配备解决集卡自动寻址、车辆自动定位报到等系统。早期的案例，如中国台北港半自动化码头总体布置与常规人工码头基本一致(图 2)。近年来，随着技术的发展，或新建或改建，出现了一批自动化程度更高的码头，如中远阿布扎比集装箱码头、日照石臼集装箱码头、宁波舟山港甬舟集装箱码头、天津五洲项目等。



图 2 中国台北港半自动化集装箱码头

### 2.1.3 堆场平行布置全自动化码头

在常规半自动化码头的基础上，水平运输设备自动化的发展(无人化集卡或 IGV 等)，为半自动化码头向全自动化码头发展提供了有力支撑，在高比例水水中转的情况下，应用效果较好。早期的名古屋 TCB 码头(图 3)，以及近年来广州港南沙港区、天津港北疆港区 C 段自动化码头是该类码头的典型代表。



图 3 日本名古屋 Toshishima TCB 集装箱码头

### 2.1.4 其他类型自动化码头

其他类型的自动化解决方案也陆续出现，如 U 形布置方案(图 4)，其特点是结合了传统全自动化码头的垂直布置，水平运输采用 AGV 或 IGV，采用双悬臂 RMG，外集卡可深入到箱区作业<sup>[5]</sup>。

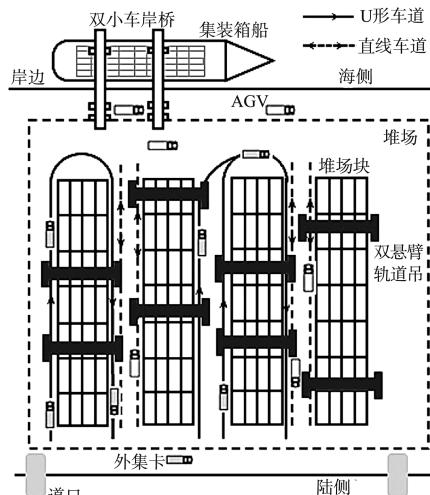


图 4 U 形布置方案

### 2.2 自动化解决方案的总体定位

对比以上几种自动化作业方式，堆场垂直布置方案可将堆场区域完全封闭，海陆侧堆场以外的水平运输均在堆场两端完成与 ARMG 的交接，堆场内部的堆、取箱以及水平运输全部由 ARMG 完成。该工艺最大限度地简化了堆场两侧水平运输设备的作业流程和路径，提高了堆场封闭区域的作业计划性、准确性和安全性，是一种适应码头智能化发展的良好方案。但垂直、封闭堆场的设置也给码头的生产运营带来一些限制和不足，包括海陆侧作业不平衡、投资较大等。

尽管近年来快速推进无人集卡方案，但尚未完全解决无人集卡与外集卡协同作业时的风险和政策限制，目前常规采用完全隔离方案。隔离方案对生产作业效率及陆域面积的利用影响较大，同时投资较高。

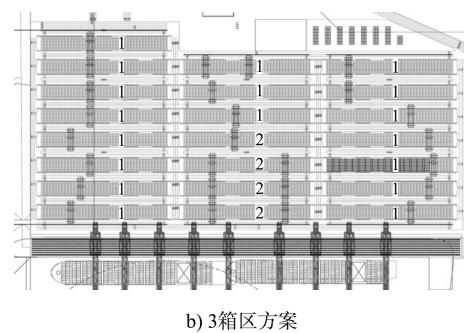
U 形方案能很好地解决原全自动化码头海、陆侧作业不平衡等缺陷，但对陆域纵深、分期建设有一定的要求，且水平运输设备投资较高。

综合以上分析，按照经济适用、近远结合的思路，并结合秘鲁当地集装箱总体发展情况，钱凯港一期工程拟采用半自动化方案(堆场自动化)，岸桥采用远程操控自动化模式，堆场平行于码头布置，堆场设备选用 ARMG 自动化作业，但堆场不整体封闭，集卡可进入堆场作业，并在设计上考虑远期采用无人集卡的可能，为进一步提升自动化作业水平留有余地。

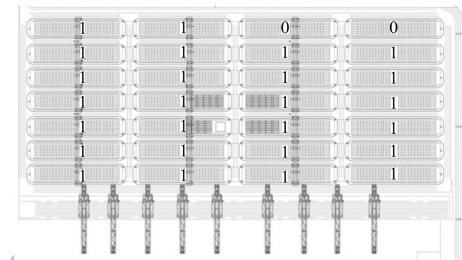
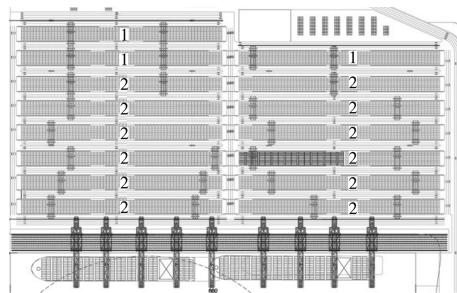
### 3 堆场自动化解决方案的选择

#### 3.1 堆场方案的布置及指标比较

根据码头和陆域现状, 为选择最优方案, 堆场区域平面布置结合路网设置分为 2 箱区、3 箱区和 4 箱区方案(图 5), 堆场区域重箱、空箱混堆, 且设有专门的冷藏箱堆场。ARMG 考虑双悬臂(2 种轨距)和单悬臂共 3 种方案。上述方案组合成的不同堆场平面布置方案指标比较见表 2。



b) 3箱区方案

c) 4箱区方案  
图 5 堆场平面方案

a) 2箱区方案

表 2 各方案指标比较

方案	箱区	ARMG	地面箱位数/TEU			箱区纵深/m
			冷藏箱	危险品箱	空重箱	
方案 1-1	2 箱区		320	180	9 900	
方案 1-2	3 箱区	轨距 31 m 双悬臂	320	180	9 240	420.0
方案 1-3	4 箱区		320	180	7 280	
方案 2-1	2 箱区		360	180	10 284	
方案 2-2	3 箱区	轨距 37 m 双悬臂	336	180	9 552	409.0
方案 2-3	4 箱区		336	180	7 562	
方案 3-1	2 箱区		320	180	10 350	
方案 3-2	3 箱区	轨距 31 m 单悬臂	320	180	10 050	357.5
方案 3-3	4 箱区		320	180	7 576	
计算值			296	165	8 842	-

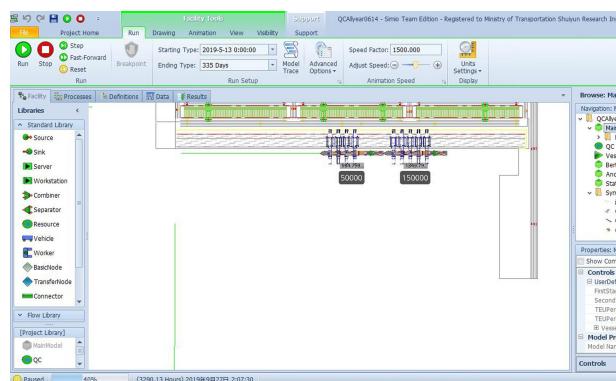
#### 3.2 模拟仿真验证优化堆场布置

##### 3.2.1 仿真建模

分别采用 Flexterm 和 Simio 软件建立高峰期作业和全年作业的系统仿真模型<sup>[6]</sup>。Flexterm 软件专门用于集装箱码头的仿真, 能够对集装箱码头典型的平面布置形式、工艺流程进行全面的模拟, 涵盖码头装卸、水平运输、堆场作业和管理、闸口大门等方面; Simio 软件是一款通用的系统仿真软件, 能用于各类对象的仿真建模研究(图 6)。



a) Flexterm软件



b) Simio软件

图 6 软件建模

### 3.2.2 试验设计

对堆场布置进行比选，对比不同 ARMG 数量时 2、3 和 4 箱区的模拟运行结果，提出推荐箱区方案。为了确定满足港口通过能力需求的最小 ARMG 数量，在上述 3 种箱区布置下，模型中场桥的数量从 26 台逐渐减小到 16 台，每减少 2 台设定 1 个工况（表 3）。以上研究均以 ARMG 轨距为 31 m、双悬臂形式为前提，并认为在其他 ARMG 类型下，能得到相同的结论。

场桥在堆场的分配依据以下原则：1) 场桥初始分配见图 5，图中数字为该堆场分配的场桥数量；2) 当场桥数量少于 26 台且场桥数量大于堆场数量时，在满足“一个堆场有一台场桥”的前提下，多出的场桥优先放到海侧、靠中间的堆场；3) 当场桥数量少于 26 台且场桥数量少于堆场数量时，优先停止使用靠近陆侧的堆场，保留靠近船头方向的堆场。

表 3 仿真实验工况设计

试验方案	场桥数量/台	堆场数量/个	地面箱位数/TEU
方案 1-1	26	15	9 900
	24	15	9 900
	22	15	9 900
	20	15	9 900
	18	15	9 900
	16	15	9 900
方案 1-2	26	22	9 240
	24	22	9 240
	22	22	9 240
	20	22	8 400
	18	18	7 560
	16	16	6 720

续表3

试验方案	场桥数量/台	堆场数量/个	地面箱位数/TEU
方案 1-3	26	26	7 290
	24	24	6 720
	22	22	6 160
	20	20	5 600
	18	18	5 040
	16	16	4 480

### 3.2.3 结果分析

经过论证，将岸桥台时效率达到 35.2 move/h 作为高峰期作业的评价标准；将服务水平为 0.2 条件下的全年合理通过能力达到 150 万 TEU 作为全年作业的评价标准。不同箱区布置达到作业标准所需最小 ARMG 数量见图 7。

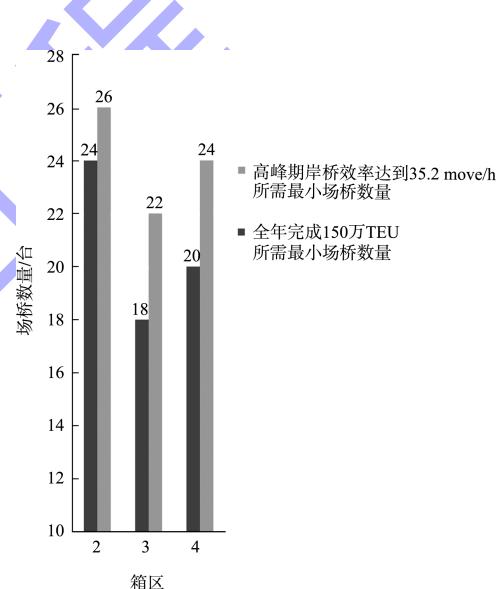


图 7 不同箱区布置达到作业标准所需最小 ARMG 数量  
(31 m 轨距、双悬臂 ARMG)

从图 7 可知，3 箱区布置优于 4 箱区和 2 箱区布置。在达到高峰期作业和全年作业评价标准的前提下，需要的最小场桥数量，3 箱区布置少于 4 箱区和 2 箱区布置。

### 3.3 堆场作业设备参数的确定

#### 3.3.1 单悬臂、双悬臂的 RMG 形式选择

RMG 主要形式有单悬臂、无悬臂、双悬臂。其中无悬臂 RMG 因其自身特性不适用于钱凯港一期半自动化码头，因此主要选择单悬臂或双悬臂作为堆场设备<sup>[7]</sup>。

### 3.3.2 设备仿真优化

设备仿真模拟试验设计基本原则同 3.2 节, 试验工况见表 7, 仿真试验结果见图 8。

表 4 堆场设备比选仿真试验工况设计

试验方案	场桥设备选型	场桥数量/台
方案 A	轨距 31 m、双悬臂	26, 24, 22, 20, 18, 16
方案 B	轨距 37 m、双悬臂	26, 24, 22, 20, 18, 16
方案 C	轨距 31 m、单悬臂	26, 24, 22, 20, 18, 16

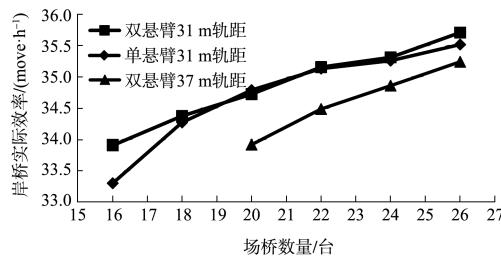


图 8 堆场设备比选仿真试验结果

### 3.3.3 结果分析

不同 ARMG 机型达到作业标准所需最小 ARMG 数量试验结果见图 9。

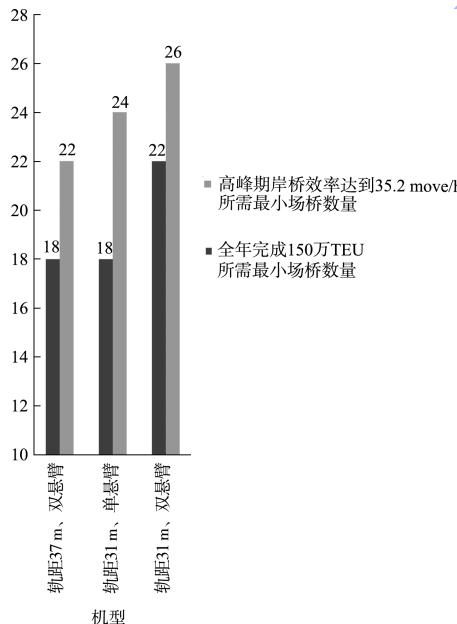


图 9 不同 ARMG 机型达到作业标准所需最小 ARMG 数量(3 箱区)

从图 9 可知, ARMG 的轨距 31 m 双悬臂方案略好于轨距 31 m 单悬臂方案和轨距 37 m 双悬臂方案: 在达到高峰期作业评价标准的前提下, 需要的最小场桥数量, 轨距 31 m 双悬臂方案少于轨距 31 m 单悬臂方案和轨距 37 m 双悬臂方案; 在达到全年作业评价标准的前提下, 需要的最小场桥数量, 轨距 31 m 双悬臂方案与轨距 31 m 单悬臂方案相同, 少于轨距 37 m 双悬臂方案。在 3 箱区布置和 18 台场桥时, 轨距 31 m 双悬臂方案的高峰期岸桥效率和全年合理通过能力均高于轨距 31 m 单悬臂方案。

## 3.4 总体装卸工艺方案

### 3.4.1 装卸船作业

装卸船作业采用单小车、远程操控自动化岸桥, 轨距 35 m, 初期配备 6 台, 远期 9 台。

### 3.4.2 堆场作业

集装箱自动化箱区分为 3 个区块, 采用空重箱混堆的方式, 作业设备为双悬臂 ARMG, 轨距 31 m。集装箱自动化箱区占用陆域宽度 365 m, 共布置 7 条 ARMG 箱条(近期实施 5 条)。ARMG 轨内布置 10 排集装箱, 海侧悬臂下为内集卡车道, 陆侧悬臂下为外集卡车道, 避免内外卡车流干扰。ARMG 初期 15 台, 远期 21 台。设立堆高 7 层的独立空箱区用于堆存船公司长期空箱, 用空箱堆高机作业; 设置独立超限、危险品箱区, 采用正面吊作业。

### 3.4.3 水平运输

集装箱水平运输采用集装箱牵引车、半挂车, 近期为人工驾驶, 远期预留无人集卡。

综合以上各项分析, 结合仿真分析、功能区域及开山边界优化等, 确定本工程总体装卸工艺方案, 布置见图 10。

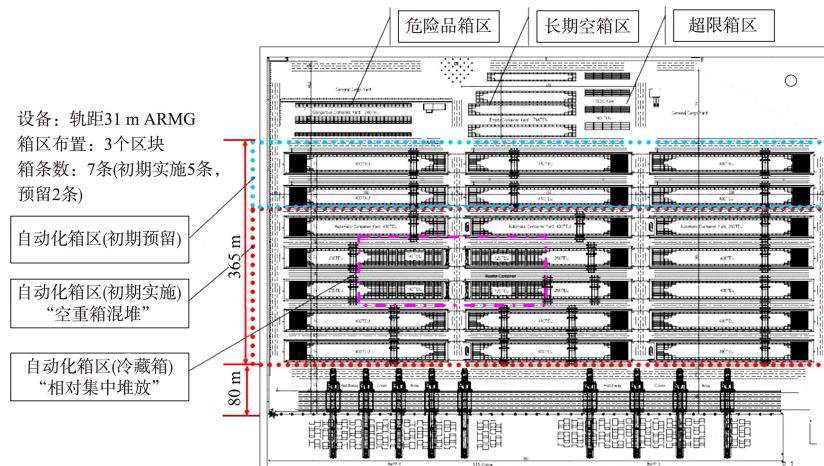


图 10 装卸工艺平面布置

#### 4 结语

1) 结合仿真模拟综合比较分析, 确定总体解决思路和流程, 可为类似码头的设计提供参考。

2) 尽管国内外建成了一批典型的自动化码头, 积累了丰富的建设和运营经验, 但各港的生产需求、管理模式存在较大差异, 不能照搬照用典型案例。

3) 对于待建的自动化集装箱港口, 应深入分析自身需求, 借助仿真等多种手段, 在规划、设计前期细致策划, 深入方案比选, 选定适合自身发展的建设方案。

#### 参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 中远海运港口秘鲁钱凯港一期工程基本设计报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.
- [2] ZHEN L, LEE L H, CHEW E P, et al. A comparative study

on two types of automated container terminal systems[J]. IEEE Transactions on automation science and engineering, 2012(1): 56-69.

- [3] 张立斌, 李刚. 高水平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.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司. 宁波舟山港金塘港区上岙作业区自动化集装箱码头总体建设方案研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2017.
- [5] 殷健, 耿卫宁, 付鹏成, 等. 广州南沙自动化码头与北部湾钦州自动化码头建设方案探讨[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(2): 88-90.
- [6] 丁一, 李甜甜. 自动化集装箱码头 U型工艺仿真研究 [EB/OL]. (2021-01-11) [2021-05-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20210111.0917.004.html>.
- [7] 何继红, 林浩, 罗勋杰, 等. 多种形式轨道吊在自动化集装箱堆场的应用[J]. 水运工程, 2016(9): 83-86.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 147 页)

- [2] 中交水运规划设计院有限公司, 交通运输部公安局. 油气化工码头设计防火规范: JTS 158—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [3] 华陆工程科技有限责任公司. 液体装卸臂工程技术要求: HG/T 21608—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [4] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 2 版. 北京: 中国石化出

版社, 2010.

- [5] 杨树人, 汪志明, 何光渝, 等. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [6] 李欣泽. 基于 SPS 软件的肯尼亚 1 号线成品油管道水击分析[J]. 油气储运, 2015, 34(6): 604-606.

(本文编辑 武亚庆)