

高架轨道式自动化集装箱码头仿真建模与分析

周鹏飞, 李玉登, 范璐璐, 姜萌

(大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为改进自动化集装箱码头装卸工艺, 提出一种新型高架轨道式集装箱码头系统(该系统还处于概念阶段, 简称新系统)的仿真模型, 并对其性能进行分析。应用 Plant Simulation 构建新系统仿真模型。与基于地面自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)的自动化集装箱码头系统(简称传统系统)进行对比, 分析新系统的作业性能和高架小车数量对作业指标的影响。仿真结果表明: 与传统系统相比, 新系统的船舶装卸时间缩短约6%, 节约了码头岸线和岸桥资源; 高架小车配置数量与码头主要指标呈近似二次关系, 建议在各作业线上配置5~6辆高架小车。结果可为新系统的后续研发和设计提供参考。

关键词: 自动化集装箱码头; 仿真模型; 高架轨道; Plant Simulation

中图分类号: U656.135; U691.34

文献标志码: A

Simulation modeling and analysis of automated container terminals with elevated rail transit

ZHOU Pengfei, LI Yudeng, FAN Lulu, JIANG Meng

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: To improve the handling process of automated container terminals, a simulation model of a new container terminal system with elevated rail transit (it is still at the stage of theory discussion, abbreviated as the new system) is proposed and its performance is analyzed. The simulation model of the new system is constructed by Plant Simulation. Compared with the automated container terminal system based on automated guided vehicle (AGV) on the ground (the traditional system for short), the influence of the performance and the number of automated vehicles on elevated rails of the new system on the operation indices is analyzed. The simulation results show that: compared with the traditional system, the ship handling time of the new system is shortened by about 6%, which saves the resources of terminal shoreline and quay cranes; the relationship between the configuration number of automated vehicles on elevated rails and each main operational index of terminals is approximately a quadratic polynomial, where 5 to 6 automated vehicles on elevated rails are advised to be configured for each operational line. The results can provide reference for the development and design of the new system.

收稿日期: 2017-12-08 修回日期: 2018-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(71101014); 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2015]1098); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16QY47)

作者简介: 周鹏飞(1977—), 男, 河南卫辉人, 副教授, 硕导, 博士, 研究方向为港口系统规划和物流运作优化, (E-mail) pfzhou@dlut.edu.cn

Key words: automated container terminal; simulation model; elevated rail; Plant Simulation

0 引言

随着国际贸易和集装箱航运业的发展,集装箱船舶趋于大型化。码头吞吐量的增长和船舶的大型化都对码头装卸能力和效率提出了更高的要求。为适应航运业的发展需求和应对人力成本的不断攀升的现状,国内外许多大中型港口(如上海港、青岛港、鹿特丹港等)都在积极发展自动化集装箱码头。新型自动化集装箱码头是该领域的重要研究方向。

近年来,针对新型码头系统发展:宓为建等^[1]提出了梭车式自动化集装箱码头系统,以减少集装箱在堆场海侧与陆侧之间的转运时间,研究表明梭车式码头作业系统能有效减少堆场翻箱作业,提高码头装卸效率;梁燕等^[2]提出了一种立体轨道式自动化装卸系统,并与现有码头装卸系统进行对比分析,研究表明立体轨道式系统在装卸效率和节能环保方面具有明显的优势;刘广红等^[3]对10种典型自动化码头的总体布局模式进行了定性对比分析;PETERING^[4]分析了集装箱码头堆场容量、内集卡数量等因素对岸桥平均利用率的影响;LIU等^[5-6]仿真分析了营运条件相同的不同自动化集装箱码头装卸工艺系统,对比分析了其作业效率和码头效益;DEMIRCI^[7]针对土耳其特拉布松港建立仿真模型,分析了集装箱码头吞吐能力的瓶颈问题;周鹏飞等^[8]仿真分析了自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)码头系统、自动装载小车(automated lifting vehicle, ALV)码头系统和立体轨道式码头系统的作业效率和设备利用率,研究表明立体轨道式码头系统的应用性更强,BAE等^[9]也做了类似的研究;梁燕等^[10]利用Witness仿真分析了立体轨道式自动化码头的工艺系统及其设备的作业效率和调度策略。

周强等^[11]提出了一种新型立体交叉高架轨道式集装箱码头装卸系统,能够很好地解决集装箱码头港内和港外车流的组织和干扰问题,有效减少集装箱堆取的垂直移动距离。该系统还处于概念阶段,未见对其性能和配置进行较系统的定量分析的研究。本文在分析高架轨道式自动化集装箱码头系统装卸工艺的基础上,应用Plant Simulation构建仿真模型,仿真分析该概念系统作业性能指标。

1 高架轨道式自动化集装箱码头分析

高架轨道式自动化集装箱码头系统主要包括岸

桥、高架轨道式水平运输系统、地面集疏运系统、轨道龙门吊、闸口系统等,其中高架轨道式水平运输系统由高架轨道、高架小车、变道控制系统(控制小车路径选择和分叉变道)等组成,典型布置见图1。^[11]码头作业可分为高架轨道装卸船作业和地面集疏运作业。前者工艺流程为岸桥↔高架小车↔轨道龙门吊,以卸船过程为例:船舶靠泊后,岸桥抓取集装箱放置于高架小车上,高架小车在变道控制系统引导下搬运集装箱到指定堆场箱位,龙门吊抓取高架小车上的集装箱到目标箱位。后者工艺流程为外集卡↔轨道龙门吊,以集运过程为例:码头根据船舶计划安排外集卡进港交箱,外集卡将出口箱运送到指定堆场龙门吊臂下交接区,龙门吊抓取外集卡上的集装箱堆放到目标箱位。

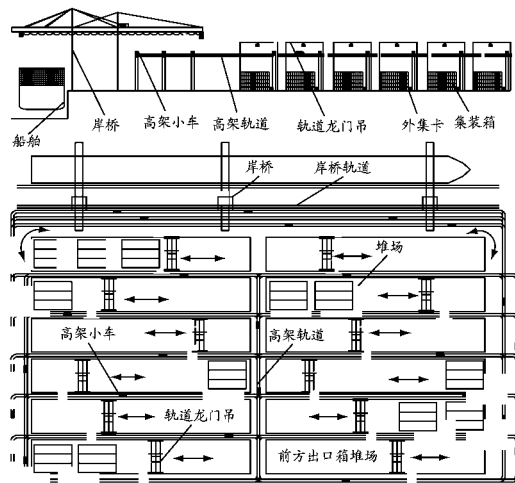


图1 高架轨道式自动化集装箱码头示意图

高架轨道式自动化集装箱码头系统的特点:
(1) 装卸船作业采用的小车在高架轨道上行驶,与地面集疏运作业车流分离,可减少两种作业活动的干扰,提高码头装卸船效率;(2) 高架轨道与岸桥和龙门吊距离较传统作业方式的更近,可缩短岸桥和龙门吊的吊具运行距离,进一步提高装卸船效率;(3) 高架轨道伸入堆场内部,可有效缩短龙门吊大车移动距离,提高龙门吊堆取箱效率。

2 基于Plant Simulation的仿真模型

高架轨道式自动化集装箱码头系统是一个典型的离散事件物流系统,Plant Simulation是一个面向对象的图形化的仿真软件平台,对于解决大规模港口物流系统仿真问题具有很强的适用性。本文应用Plant Simulation构建高架轨道式自动化集装箱码头仿真系统,实现对码头装卸作业过程的模拟。在输

入的基本参数一定的情况下,设计3种方案并获得不同方案下的输出数据,以此为基础分析高架轨道式物流系统的作业性能。











高架轨道式自动化集装箱码头作业系统涉及码头装卸船系统、堆场作业系统和高架小车水平运输系统,作业环节较多。为降低仿真模型的复杂性,必须结合建模的目标和原则,将码头实体和作业过程合理简化。本文对比分析高架轨道系统与传统码头系统的作业性能,以及高架小车数量与作业指标的关系。针对高架轨道式自动化集装箱码头各对象要素的特点选择主要仿真单元(表1),仿真流程见图2。主要事件仿真实现如下:

(1) 船舶到离港和靠泊仿真。根据船舶信息表(TableFile),时间触发器 Trigger 调用 Method 单元生成船舶,用于模拟船舶到港。泊位空闲时船舶靠泊,否则船舶在锚地等待(Buffer)。船舶靠泊后更新泊位状态,并设置全局变量记录船舶剩余装卸任务。利用时间触发器 Trigger 调用 Method 单元判断船舶装卸作业是否完成,船舶是否满足离港条件。

(2) 装卸船作业仿真。卸船过程仿真:船舶靠泊后,MultiPortalCrane 模拟岸桥将集装箱(Entity)从船上卸到高架小车(Transporter)上,然后高架小车沿高架轨道(Track)驶入指定堆场箱区贝位(Sensors控制点),利用 Track 的出口控制 Method 单元模拟高架小车在轨道分叉道口的变道,StorageCrane 模拟堆场龙门吊从高架小车上抓取集装箱并卸载到指定堆场箱区贝位,完成一个卸箱任务。装船过程与卸船过程相反,仿真方法与其类似。

(3) 重卡交箱和轻卡取箱。重卡交箱:首先利用两个 Source 单元依据 TableFile 中的出口箱到港时间(由车辆到港分布产生)分别生成外集卡和出口箱,然后利用 TransferStation 加载生成到港重卡,利用 SingleProc 模拟重卡通闸检查,重卡通过地面车道(Track)行驶到指定堆场箱区贝位,StorageCrane 模拟堆场龙门吊抓取外集卡上的集装箱并堆放到堆栈(Store),最后重卡完成交箱驶离码头。时间触发器 Trigger 调用 Method 单元依据进口箱出港时间生成轻卡,模拟轻卡到港,后续仿真与重卡类似。

表1 仿真模型采用的主要仿真单元

序号	对象图标	对象名	主要功能
1		Entity	移动对象单元,用于集装箱实体的仿真建模
2		Transporter	移动对象单元,用于高架小车和集卡的仿真建模
3		Source	模拟产生单元,用于高架小车和外集卡产生过程的仿真建模
4		Drain	离港单元,用于集装箱和外集卡离港的仿真建模
5		SingleProc	单机处理单元,用于进出闸口过程的仿真建模
6		Buffer	缓冲单元,用于船舶和外集卡排队等待的仿真建模
7		Track	轨道单元,用于高架轨道与港内道路的仿真建模,通过单元传感器控制高架小车与集卡对位
8		Store	储位单元,用于船舶和堆场的集装箱堆栈储位的仿真建模
9		StorageCrane / MultiPortalCrane	起吊作业单元,用于岸桥和龙门吊作业的仿真建模,可设置速度等作业参数
10		Trigger	时间触发器单元,用于触发船舶和轻卡到港生成等

3 仿真与分析

3.1 仿真基本参数与模型检验

依据北方某码头资料设计仿真工况,3个顺岸式码头泊位,岸线长度1 000 m,每个泊位后方均设

10个箱区,堆场容量50 400 TEU,码头共配置9台岸桥、30台轨道龙门吊和36辆高架小车,闸口设置6条通道,到港船型容量为1 000Int(U(1,8.2)) TEU,装卸箱量为容量20%~40%的均匀分布。主要设备参数见表2。仿真系统可视部分见图3。

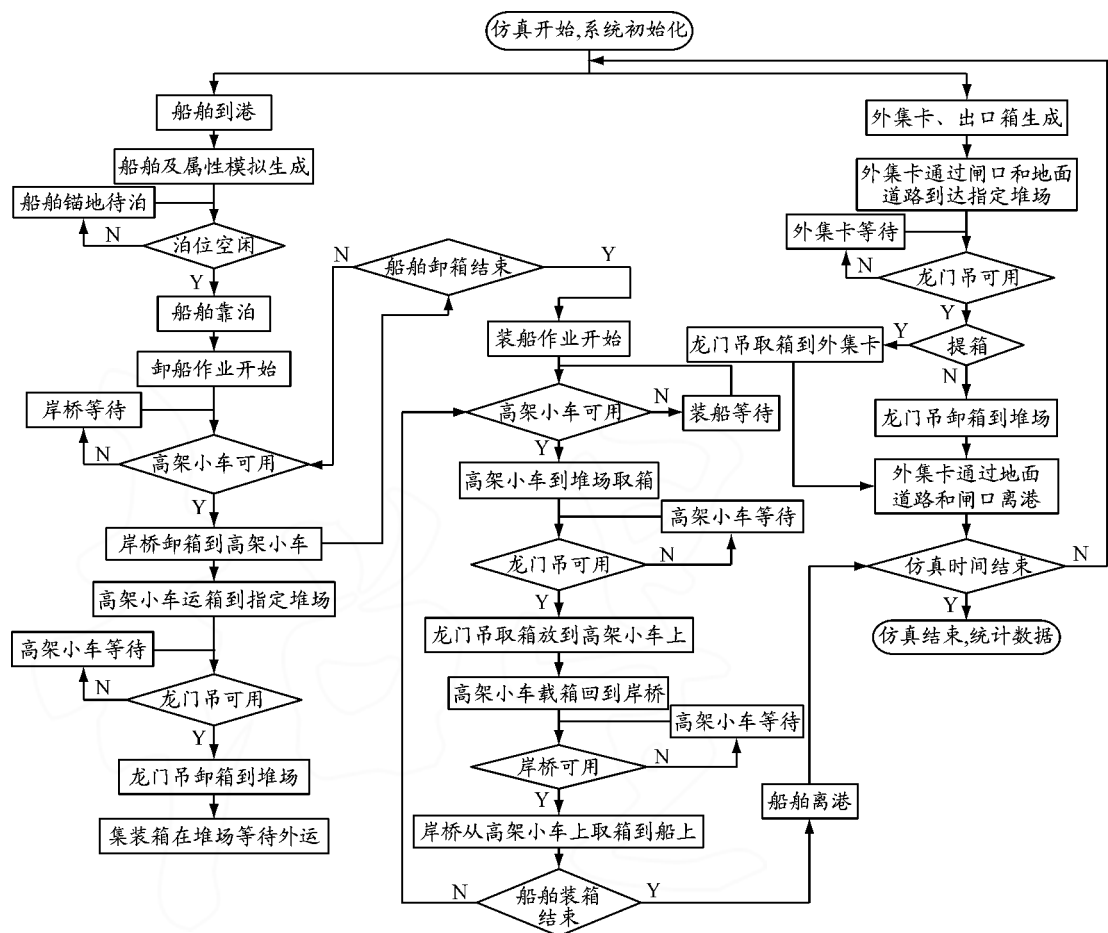


图 2 高架轨道式自动化集装箱码头仿真流程

表 2 高架轨道式自动化集装箱码头仿真系统参数

参数	岸桥小车 速度	岸桥大车 速度	场桥小车 速度	场桥大车 速度	高架小车 速度	外集卡 速度	进出口集装箱在 港堆存时间分布	箱区规模
取值	3.0 m/s	1.0 m/s	3.0 m/s	1.5 m/s	6.0 m/s	6.0 m/s	U(1 d,5 d)	20 贝×8 栈×5 层

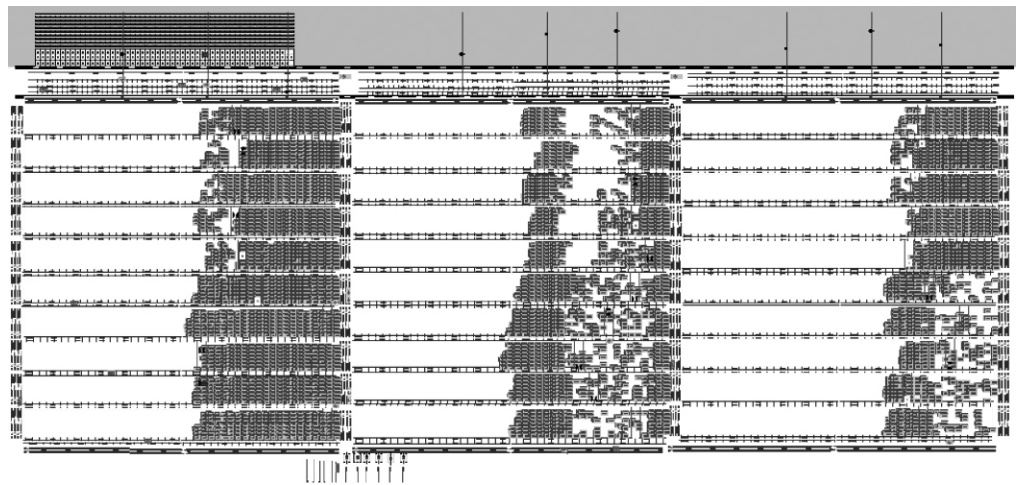


图 3 高架轨道式自动化集装箱码头仿真系统截图

仿真系统的检验: 通过检查仿真系统动态运行可以看出,过程仿真模型与概念系统流程吻合,且未发现仿真系统中岸桥、高架小车、集装箱位置、外集卡和闸口等模块运行异常; 对输入分布进行假设检验,得到进出口箱在港堆存时间分布的检验结果(见表 3) 和堆场箱量分配的卡方检验结果(见表

4)。表 3 中的显著性检验 P 值(双侧)为 0.421(大于 0.1),表明仿真试验的进出口箱在港堆存时间分布与假设无显著性差异。表 4 中的显著性检验 P 值远大于 0.1,表明各堆场箱量分配无显著性差异。

表 3 进出口箱在港堆存时间分布的 K-S 检验

样本数 N /个	均匀分布参数		极端差别			K-S 检验 Z 值	渐进显著性 P 值(双侧)
	最小值/s	最大值/s	绝对	正	负		
38	90 374	467 670	0.139	0.139	-0.030	0.814	0.421

表 4 堆场箱量分配的卡方检验

卡方检验统计量	自由度	渐进显著性 P 值
12.370	99	1.000

3.2 仿真分析

为了对比分析高架轨道式自动化集装箱码头性能和车辆配置影响,设计多组仿真工况(见表 5),其中方案 A 和 C 为高架轨道式系统,方案 B 为传统地面 AGV 系统,仿真参数设置相同,仿真时长为 1 a。

表 5 仿真工况参数设置

方案_工况	船舶到港时间间隔均值/h	岸桥大车速度/(m/s)	高架小车(或 AGV)速度/(m/s)	单线路高架小车(或 AGV)平均数量/辆
A_1,A_2,A_3,A_4	20,15,10,5	1.0,1.0,1.0,1.0	6.0,6.0,6.0,6.0	4,4,4,4
B_1,B_2,B_3,B_4	20,15,10,5	1.0,1.0,1.0,1.0	6.0,6.0,6.0,6.0	4,4,4,4
C_3,C_4,C_5,C_6	10,10,10,10	1.0,1.0,1.0,1.0	6.0,6.0,6.0,6.0	3,4,5,6

表 6 为两种不同工艺系统的码头服务水平(船舶平均在港时间、岸桥装卸效率)和资源占用率(泊位和岸桥占用率)指标的对比。由表 6 可以看出:(1)高架轨道式系统较传统地面 AGV 系统的船舶在港时间平均减少 6.8%,船舶装卸时间平均减少 6.3%,岸桥台时效率平均提高 5.8%,显著改善了码头服务水平;(2)与传统地面 AGV 系统相比,高架轨道式系统的资源利用率有下降的趋势,如泊位

利用率平均降低 7.3%,岸桥利用率平均降低 6.9%,小车利用率平均下降 9.0%,明显节约了码头资源,提高了码头装卸作业能力。高架轨道式系统较传统地面 AGV 系统的优势在于该系统实现了码头装卸与集疏运的车辆分流,避免了交通拥挤和等待,并且由于高架小车位置高,可以节省场吊和岸桥的抓取移动距离。

表 6 两种码头系统的作业指标对比

方案_工况	吞吐量/万 TEU	船舶平均在港时间/h	船舶平均装卸时间/h	船舶最长装卸时间/h	小车平均利用率/%	泊位平均利用率/%	岸桥平均利用率/%	岸桥平均台时效率/(箱/h)
A_1,B_1	107,107	19.27,21.31	19.27,21.30	42.32,46.37	30.86,35.00	33.16,36.58	30.02,32.74	46,43
A_2,B_2	124,126	17.71,18.56	17.65,18.44	39.01,42.52	37.59,41.18	39.37,42.88	35.58,38.36	45,43
A_3,B_3	133,132	13.38,14.53	13.30,14.39	31.58,33.13	42.24,46.03	44.45,47.94	40.34,43.86	42,40
A_4,B_4	162,162	8.85,9.34	8.80,9.17	20.37,23.26	55.51,59.84	59.03,61.75	53.31,55.48	40,37

由图 4 可以看出:高架小车配置数量与码头主要指标呈近似二次关系(拟合优度检验 R^2 均大于 0.99);当高架小车配置数量较少时,增加车辆配置

数量可显著提高码头服务水平,减少资源占用率,如高架小车配置数量从 3 辆增加到 5 辆时船舶平均在港时间缩短 29.9%,岸桥台时效率提高 25.0%,泊

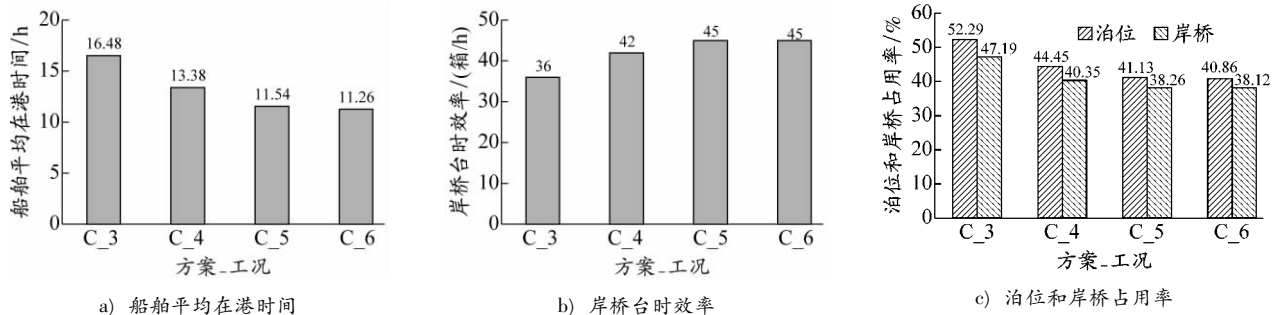


图 4 高架轨道式集装箱码头作业指标随车辆配置数量的变化

位占用率下降 21.3%,岸桥占用率下降 18.9%;随着高架小车数量的增加,相关指标改善程度越来越小,如高架小车配置数量从 5 辆增加到 6 辆时,各项技术指标改善很小。

4 结 论

在分析高架轨道式自动化集装箱码头装卸工艺系统(简称新系统)的基础上,应用 Plant Simulation 构建了集装箱码头仿真模型,对其进行了仿真分析。仿真表明:(1)应用 Plant Simulation 构建的仿真模型满足仿真验证条件,仿真模型具有可信性;(2)在相同岸线、岸桥和堆场资源条件下,新系统的服务水

平和资源占用率指标均比基于地面 AGV 的自动化集装箱码头系统的好,船舶在港时间平均缩短约 6.8%,岸桥台时效率平均提高 5.8%,节约码头资源占用率约 7.0%;(3)高架小车配置数量与码头主要指标呈近似二次关系,仿真工况中小车配置从 3 辆增加到 5 辆时船舶在港时间显著缩短,岸桥台时效率提高 25.0%,当车辆配置数量大于 5 辆时码头主要指标基本没有变化,故各作业线上的高架小车配置不宜过少,建议 5~6 辆。研究成果可为高架轨道式自动化集装箱码头的后续研发和设计提供参考。

参考文献:

- [1] 宓为建,杨小明,舒帆. 自动化集装箱码头箱区作业仿真分析[J]. 集装箱化, 2014, 25(12): 19-22. DOI: 10.13340/j. cont. 2014. 12. 006.
- [2] 梁燕,吴富生,叶军. 一种新型立体轨道式自动化集装箱码头及其效能分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(2): 135-137.
- [3] 刘广红,程泽坤,林浩,等. 自动化集装箱码头总体布局模式对比分析[J]. 水运工程, 2016(9): 14-18.
- [4] PETERING M E H. Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals[J]. Transportation Research Part E, 2011, 47: 85-103. DOI: 10.1016/j. tre. 2010. 07. 007.
- [5] LIU Chin-I. Design, modeling, simulation and optimization of automated container terminal[D]. Los Angeles, California: University of Southern California, 2001.
- [6] LIU Chin-I, JULA H, VUKADINOVIC K, et al. Automated guided vehicle system for two container yard layouts[J]. Transportation Research Part C, 2004, 12(5): 349-368. DOI: 10.1016/j. tre. 2004. 07. 014.
- [7] DEMIRCI E. Simulation modeling and analysis of a port investment[J]. Simulation, 2003, 79(2): 94-105. DOI: 10.1177/0037549703254523.
- [8] 周鹏飞,杨云. 集装箱码头先进作业工艺系统仿真与对比[J]. 水运工程, 2015(7): 71-75.
- [9] BAE H Y, CHOE R, PARK T, et al. Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22: 413-426. DOI: 10.1007/s10845-009-0299-1.
- [10] 梁燕,吴富生,叶军. 立体轨道式自动化码头设备调度策略仿真分析[J]. 起重运输机械, 2012(2): 8-13.
- [11] 周强,黄倩,李建成,等. 高架轨道交通式集装箱码头装卸新工艺与性能评价[J]. 水运工程, 2014(10): 67-70.

(编辑 贾裙平)