

集装箱码头铁路装卸线/场布置对铁水联运 作业效率的影响

张涌昊¹, 张智凯¹, 丁文涛², 王达川²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广州 510230; 2. 交通运输部规划研究院, 北京 100028)

摘要: 为通过合理布置集装箱码头铁路装卸线/场提高铁水联运作业效率, 在分析铁水联运作业流程、铁路装卸线/场布置特点的基础上, 基于多智能体仿真技术, 构建铁水联运作业系统仿真模型。以某集装箱码头为例, 研究铁路装卸线/场布置及装卸设备数量对铁水联运作业系统的影响, 在得到各方案指标值的基础上, 对各方案进行定量分析。该研究成果可为相关工程规划、建设提供理论参考。

关键词: 集装箱码头; 铁路装卸线/场; 布置; 仿真优化; 多智能体

中图分类号: U651.5

文献标志码: A

Effect of railway line/yard layout of container terminals on railway-water combined transportation efficiency

ZHANG Yonghao¹, ZHANG Zhikai¹, DING Wentao², WANG Dachuan²

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of railway-water combined transportation by planning the railway line/yard of container terminals reasonably, on the basis of the analysis on the railway-water combined transportation operation flow and the characteristics of railway line/yard layout, the simulation model of railway-water combined transportation operation system is built on the basis of the multi-agent simulation technology. Taking a container terminal as an example, the influence of the railway line/yard layout and the number of handling equipments on the operation system of railway-water combined transportation is studied. Based on the obtained index values of each scheme, the quantitative analysis of each scheme is carried out. The research results can provide theoretical reference for related engineering planning and construction.

Key words: container terminal; railway line/yard; layout; simulation optimization; multi-agent

0 引言

随着我国对集装箱港口装卸效率和集疏运效率要求的不断提高,集装箱铁水联运凭借其运量大、运输成本低、低碳环保等优势在集装箱运输中的地位日益凸显。铁路装卸线/场是铁水联运过程中进行铁水换装作业的重要作业区,其布置形式直接影响着铁水联运的作业效率。

对于铁路装卸线/场布置问题,国内外学者已经做了一系列研究。李羽道^[1]、王玥葳^[2]、赵红霞^[3]和BOYSEN等^[4]借助数学分析方法研究了铁路装卸线/场的布置。甘志雄^[5]和YE等^[6]通过构建数学模型研究了铁路装卸线/场的装卸设备配置问题。然而,集装箱铁水联运作业系统是具有随机性、动态性的复杂系统,仅采用数学方法很难真实反映作业系统的特点,因此仿真技术被应用到集装箱铁水联运的研究中。曾鸣^[7]、唐连生^[8]、GARCÍ等^[9]、梁剑^[10]、李东等^[11]利用仿真技术对铁路装卸线/场平面布置、作业设备配置进行了研究。这些研究多集中在如何通过合理布置某一作业区,并配置相应的作业设备来提高作业效率,所考虑的系统范围较小。因此,有必要在考虑整个集装箱港区铁水联运作业系统的基础上,研究铁路装卸线/场布置对铁水联运作业效率的影响。为此,本文以铁路装卸线/场为研究对象,在考虑包括码头前沿作业区、堆场作业区和铁路装卸线/场及各作业区作业设备的集装箱港区作业系统的基础上,构建集装箱铁水联运作业系统仿真模型。

1 问题描述

图1是我国集装箱铁水联运港区典型陆域布置示意图。集装箱铁水联运港区陆域一般由码头前沿作业区、堆场作业区和铁路装卸线/场等组成。铁路装卸线/场一般布置有铁路装卸线、铁路堆场、集卡作业通道等空间资源和轨道门吊、集卡等设备资源^[12]。分布在轨道门吊内的铁路装卸线股数和铁路堆场的容量,受轨道门吊跨度的空间限制,难以进行扩展。合理的布置形式会提高铁路装卸线/场的作业效率,进而提高铁水联运整体作业效率。配置的轨道门吊、集卡的数量也是影响码头各作业环节有效衔接的重要因素。因此,本文以铁路装卸线/场的布置形式作为研究目标,并分析各方案中装卸设备配置数量对铁水联运作业效率的影响。

集装箱列车和各装卸设备在铁路装卸线/场的作业效率是衡量铁路装卸线/场布置合理性的重要标准。因此,本文选取列车装卸时间、列车等待时间、集卡排队等待时间和铁路装卸线/场的场桥利用

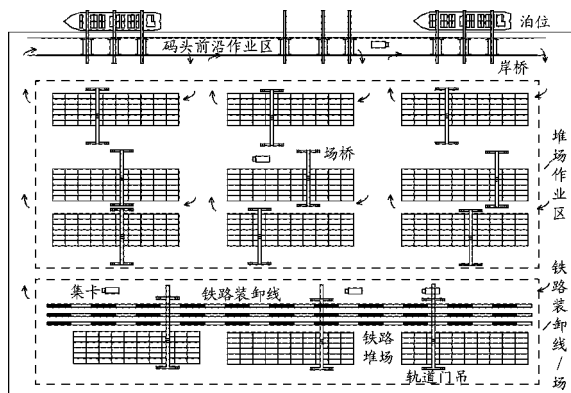


图1 集装箱铁水联运港区陆域布置示意图

率作为评价指标。

2 仿真模型

2.1 装卸工艺流程

集装箱铁水联运作业相关事件间的触发关系见图2。在码头前沿岸桥将进口集装箱从船舶卸到集卡上:当满足“车船直取”作业条件时,集卡行驶至铁路装卸线/场,随后轨道门吊将集装箱从集卡上卸下并装载到列车上,然后列车进行疏港作业;当不满足“车船直取”作业条件时,集卡行驶至堆场作业区,随后龙门吊将集装箱卸至堆场先进行堆存,经过一定时间后内卡将集装箱运到铁路装卸线/场装列车进行疏港,或通过外卡疏港。出口集装箱与进口集装箱的铁水联运作业流程相反。

2.2 模型实现

集装箱铁水联运作业系统是一个包含多个子系统的复杂系统。因此,本文将集装箱铁水联运港区的作业区和实体视为智能体,运用Anylogic仿真软件构建基于多智能体技术的集装箱铁水联运作业系统仿真模型。根据系统特征,本模型中的多智能体包括集装箱铁路装卸线/场、泊位、堆场、列车、船舶、岸桥、场桥、内卡、外卡和闸口。通过赋予各智能体特有的属性和构建表示各智能体的状态(state)和状态变迁(transition),实现集装箱铁水联运作业过程的模拟以及各智能体实时状态的追踪。列车、集卡智能体模型见图3。

(1) 铁路装卸线/场智能体。初始状态为Rail-Free(装卸线空闲);当列车到港占用铁路装卸线后状态变为TrainOccupyRail(列车占用装卸线);列车开始卸箱时状态变为TrainUnLoad(列车卸箱);当列车完成卸箱作业,开始装箱作业时,状态变为Train-Load(列车装箱);列车装卸作业结束离港后,状态恢复到RailFree。泊位智能体的状态变迁与铁路装卸线/场智能体相似。

(2) 列车智能体。当列车智能体到达后,如有

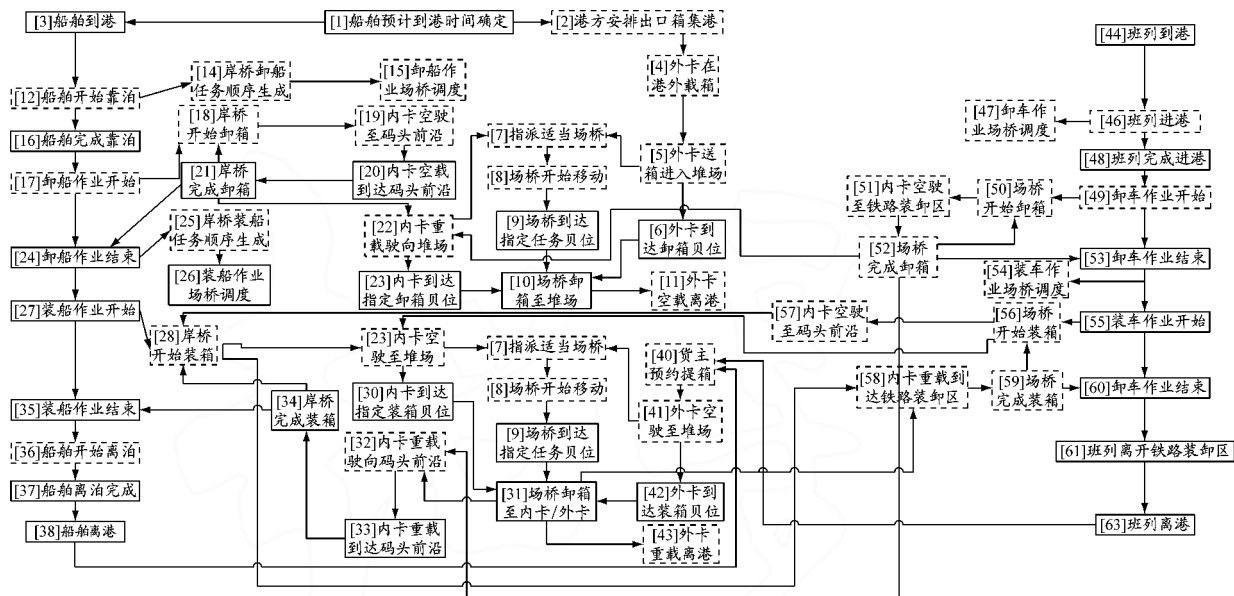


图2 集装箱港区铁水联运作业相关事件间的触发关系

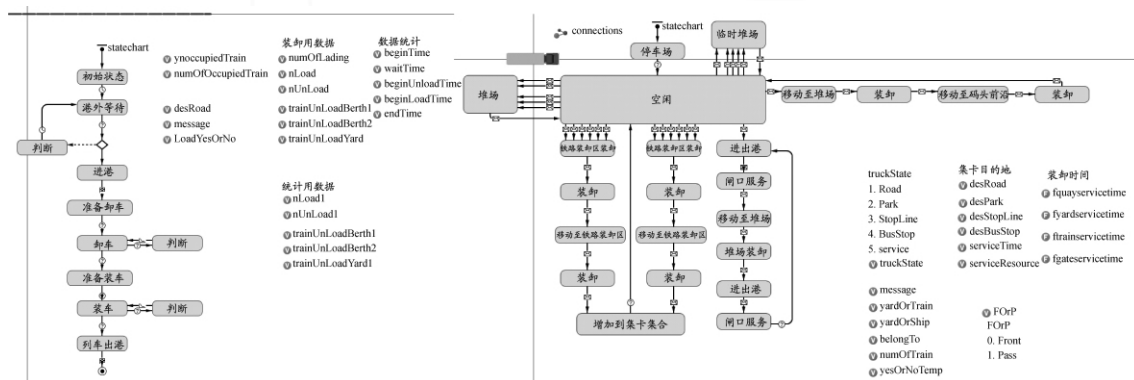


图3 列车、集卡智能体模型

铁路装卸线空闲(在 Main 智能体中统计装卸线空闲情况),则列车驶入港区,状态由 Free(列车空闲)转变为 OnPort(列车进港);列车完成停车后状态变为 TrainOnPort(列车占用装卸线);列车卸箱作业开始时,给集卡发送取箱信息,状态变成 TrainUnLoad-Processing(列车卸箱作业);完成卸箱作业后开始装箱作业,给集卡发送信息,状态变为 TrainLoadProcessing(列车装箱作业);列车完成作业后,释放所占用的集卡离开港区,状态变回到 Free。船舶智能体的状态变迁与列车智能体相似。

(3) 场桥智能体。场桥智能体初始处于 Yard-Free(场桥空闲)状态。当场桥接收到装箱的消息后,状态变为 YardLoad(场桥装箱);当完成装卸作业后,状态恢复至 YardFree;当场桥接收到卸箱的消息后,状态变为 YardUnLoad(场桥卸箱);当完成装卸作业后,状态恢复至 YardFree。岸桥智能体的状态变迁与场桥智能体类似。

(4) 内卡智能体。内卡最初处于 Free(内卡空

闲)状态,停在停车场。当船舶开始卸箱时会向内卡发送信息,内卡状态变成 ShipUnLoad(内卡在码头前沿卸箱),在这一状态下内卡行驶到码头前沿与岸桥配合完成卸箱作业,根据铁路装卸线/场状态及堆场状态判断是将集装箱卸于堆场还是进行车船直取作业,完成这一系列作业后内卡变回到 Free 状态。当船舶进行卸箱作业、列车进行装箱或卸箱作业时内卡状态在 ShipLoad(内卡在码头前沿装箱)、TrainUnLoad(内卡在装卸线卸箱)、TrainLoad(内卡在装卸线装箱)和 Free(内卡空闲)之间转换。

(5) 在构建模型时考虑集卡在港内行驶的交通特性,借助 Anylogic 自带的交通库,采用混合建模的方法,实现集卡在港区内的加速、减速和避让动作。

(6) 事件创建与调度算法。列车或船舶到达、出口箱送箱、进口箱提箱等随机事件由“inject()”方法产生。本模型根据实际港口调度规则设计了多个算法:①铁路装卸线和泊位分配、岸桥和场桥装卸作业遵循先到先服务(FCFS)规则,岸桥卸船采用按

组自上而下的顺序产生作业任务顺序,场桥调度按一定比例为作业船舶配置场桥,内卡调度采用一台岸桥、一台场桥固定分配一定数量内卡的方式。②集装箱船舶和集装箱列车都采用“先卸后装”的调度策略。③当满足船舶卸箱、列车装箱或满足船舶装箱、列车卸箱时,采用“车船直取”作业模式,即列车卸下的箱直接由集卡运至码头前沿进行装船,或船舶卸下的箱直接由集卡运至铁路装卸线/场进行列车装箱。

(7) 模型参数。①船舶智能体: 船舶吨级、船舶载箱量、船舶装卸箱量、船舶到港时间间隔。②列车智能体: 列车载箱量、列车装卸箱量、列车到港时间间隔。③岸桥智能体: 配置数量、装卸效率。④场桥智能体: 堆场和铁路装卸线/场配置数量、装卸效率。⑤内卡智能体: 内卡配置数量、内卡行驶速度。⑥外卡智能体: 外卡到港规律、外卡行驶速度。⑦泊位智能体: 泊位数量、泊位吨级。⑧堆场智能体: 堆场容量、堆场布置形式、进出口箱在堆场的堆存期。⑨铁路装卸线/场智能体: 铁路装卸线股数、铁路临时堆场容量。⑩闸口智能体: 闸口通道数量、闸口服务效率。

3 应用实例

以某在建集装箱港区作为算例,码头顺岸连续布置2个20万吨级集装箱泊位,岸线长约960 m,陆域纵深约900 m。泊位后方码头陆域从前向后依次为码头前沿作业区、堆场作业区和铁路装卸线/场。泊位设计通过能力125万TEU。

3.1 仿真方案

铁路集疏运量为50万TEU,公路集疏运量为75万TEU。到港集装箱船装载量有5万TEU、7万TEU、10万TEU、12万TEU、15万TEU和20万TEU等6种,码头前沿配置10台岸桥,堆场配置40台轮胎吊,港内配置50辆集卡。根据铁路装卸线/场布置作业线股数的不同共考虑4种布置方案,装卸工艺采用双悬臂轨道吊,铁路装卸线长度850 m,每列集装箱箱位122个,布置2层(即每列可容纳244个集装箱),各方案布置形式见表1。铁路装卸线/场场桥取3、4、5、6、7、8、9台等7种配置方案,集卡与场桥配置数量之比为3:1。

3.2 仿真参数

①船舶智能体参数: 船舶到港时间间隔服从负指数分布: $\text{exponential}(0.65)$, 单位为d^[13]。②列车智能体参数: 每列车能容纳集装箱110 TEU, 列车到

表1 铁路装卸线/场平面布置方案

布置方案	作业线/股	进口箱区/列	出口箱区/列	进口箱区容箱数/TEU	出口箱区容箱数/TEU
方案1	1	5	5	1 220	1 220
方案2	2	4	4	976	976
方案3	3	3	3	732	732
方案4	4	2	2	488	488

港时间间隔为3.85 h。③岸桥智能体参数: 岸桥每箱装卸作业时间为三角分布(1.0, 1.5, 2.0) min。④场桥智能体参数: 场桥单箱装卸时间为三角分布(1.2, 2.0, 3.4) min。⑤内卡智能体参数: 内卡空载时和重载时的行驶速度分别为35、25 km/h。⑥外卡智能体参数: 外卡根据船舶到港情况提前1~3 d进港送箱, 3~7 d内进港提箱^[14], 外卡空载时和重载时的行驶速度分别为35、25 km/h^[15]。⑦泊位智能体: 布置2个20万吨级泊位。⑧堆场智能体: 堆场平行于码头岸线布置, 出口箱在堆场内的堆存期为3 d, 进口箱在港堆存期为7 d^[14]。⑨铁路装卸线/场智能体: 铁路装卸线股数和铁路装卸线/场进、出口箱位数见表1。⑩闸口智能体: 闸口通道数量为10条, 服务时间服从正态分布 $N(1.25, 0.25)$ min^[16]。

4 结果分析

各方案仿真10次, 每次仿真时间设置为1周。对仿真结果进行处理, 取其平均值。分析仿真结果, 得到如下结论:

列车装卸时间、等待时间的分析结果见图4: 当铁路装卸线/场配置3台场桥时, 各方案列车平均在港总时间超过3.85 h, 不能满足装卸需求。如图5所示, 当场桥配置数量增至4台时, 列车装卸时间为127 min, 相比于配置3台场桥时缩短43%, 满足每3.85 h装卸1列列车的需求。配置4台场桥时列车装卸时间从短到长依次为: 铁路装卸线股数为3、铁路装卸线股数为1、铁路装卸线股数为2、铁路装卸线股数为4。当场桥配置数量从4台增加至9台时, 列车装卸时间从127 min缩短至63 min, 平均每增加1台场桥, 列车装卸时间缩短13.0%。

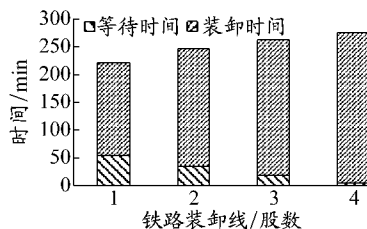


图4 配置3台场桥时的列车装卸时间和等待时间

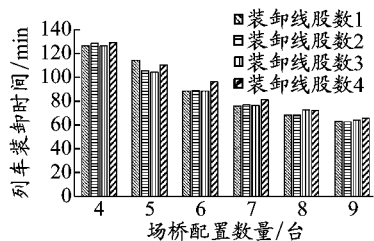


图5 不同铁路装卸线/场布置方案下的列车装卸时间

集卡排队等待时间的分析结果见图6。由图6可知,配置4台场桥时的集卡排队等待时间比配置3台场桥时的减少31%。配置4台场桥时集卡排队等待时间从短到长依次为:铁路装卸线股数为4、铁路装卸线股数为3、铁路装卸线股数为1、铁路装卸线股数为2。场桥配置数量从4台增加至9台时,集卡排队等待时间从8 859 min 缩短至3 978 min,平均每增加1台场桥,集卡排队等待时间缩短14.8%。

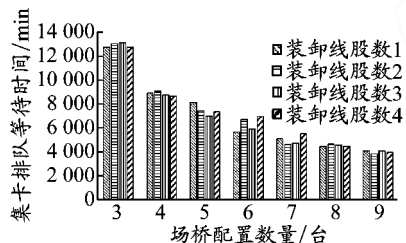


图6 不同铁路装卸线/场布置方案下的集卡排队等待时间

场桥利用率的分析结果见图7。由图7可知,配置4台场桥时的场桥利用率比配置3台场桥时的

减少21%。配置4台场桥时的场桥利用率从低到高依次为:铁路装卸线股数为4、铁路装卸线股数为3、铁路装卸线股数为1、铁路装卸线股数为2。场桥配置数量从4台增加至9台时,场桥利用率从49%降低至24%,平均每增加1台场桥,场桥利用率减少13.3%。

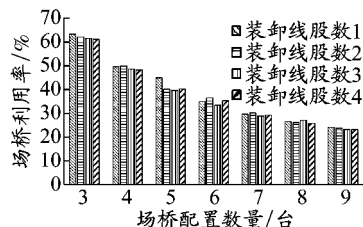


图7 不同铁路装卸线/场布置方案下的场桥利用率

5 结 论

本文基于多智能体仿真技术构建了集装箱铁水联运作业系统仿真模型,以提高铁水联运作业效率为目标对铁路装卸线/场的布置进行了研究。仿真案例分析表明:

(1) 应用该仿真模型可以定量分析不同布置方案对铁路装卸线/场的影响;(2) 该模型可以为集装箱港区的铁路装卸线/场的布置及装卸设备数量的优化提供技术手段,以保证码头各作业流程的高效衔接;(3) 集装箱码头作业具有很大的随机性和不确定性,该研究成果可为集装箱港区铁路装卸线/场相关工程提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李羽道. 铁水联运港站集装箱作业区布局研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [2] 王玥葳. 基于海铁联运的集装箱港口布局与运作问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [3] 赵红霞. 现代物流条件下铁路集装箱中心站设施布局优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [4] BOYSEN N, FLIEDNER M, JAEHN F, *et al.* A survey on container processing in railway yards[J]. *Transportation Science*, 2013, 47(3): 312-329.
- [5] 甘志雄. 基于物联网技术的铁路集装箱中心站堆场资源配置优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [6] YE Fei, XIE Haihong, JIN Xin. Optimization on configuration of handling equipment in railway container terminal during operation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 253-255: 1245-1248.
- [7] 曾鸣. 铁路集装箱中心站物流系统资源调配优化与仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [8] 唐连生. 铁路集装箱中心站最佳通道数设计问题研究[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(3): 367-371.
- [9] GARCÍA A A, GARCÍA A I. A simulation-based flexible platform for the design and evaluation of rail service infrastructures[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 27: 31-46.
- [10] 梁剑. 铁路集装箱物流中心站资源配置决策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [11] 李东, 汪定伟. 基于仿真的铁路集装箱装卸策略优化[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(11): 3188-3191.
- [12] 刘学武, 魏恒州. 集装箱码头铁路装卸线/场总体布置浅析[J]. *港工技术*, 2015, 52(4): 20-22.
- [13] 徐灵杰. 集装箱班轮到港规律的概率分布及其特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [15] 周强, 肖娇娇, 陶德馨. 集装箱码头前沿交通流模型研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2005, 29(4): 487-490.
- [16] 陈中亚. 基于集装箱堆存策略的闸口服务水平优化方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

(编辑 贾裙平)