

# 集装箱码头铁路装卸线多智能体仿真建模研究

李 达<sup>1</sup>, 唐国磊<sup>1</sup>, 宋向群<sup>1</sup>, 于菁菁<sup>1</sup>, 齐 越<sup>2</sup>, 于旭会<sup>1</sup>, 赵晓艺<sup>1</sup>, 张涌昊<sup>3</sup>

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2.交通运输部规划研究院, 北京 100028; 3.中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:**以集装箱码头铁路装卸线作业系统为研究对象,在分析该系统特征的基础上,基于多智能体仿真技术和微观交通仿真技术,构建了集装箱码头铁路装卸线作业系统仿真模型,模拟了进出口集装箱通过整个系统的作业流程。

**关键字:**集装箱码头; 铁路装卸线; 多智能体仿真; 微观交通

中图分类号: U651<sup>+</sup>.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-9592 (2018) 04-0006-04

DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20180402

## Multi-agent Simulation Modeling for Railway Loading/Unloading Line of Container Terminal

Li Da<sup>1</sup>, Tang Guolei<sup>1</sup>, Song Xiangqun<sup>1</sup>, Yu Jingjing<sup>1</sup>, Qi Yue<sup>2</sup>, Yu Xuhui<sup>1</sup>,  
Zhao Xiaoyi<sup>1</sup>, Zhang Yonghao<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China; 2.Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China; 3.CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510230, China)

**Abstract:** Based on the operation system of railway loading/unloading line of container terminal, by analyzing the system, a model was built by using multi-agent and micro-traffic techniques, which simulated the export and import process of containers.

**Key words:** container terminal; railway loading / unloading line; multi-agent simulation; micro-traffic

## 引 言

港口铁路对港内作业势必有所影响,也直接影响到自身装卸线的布置与规模。考虑到集装箱码头各生产环节存在随机性以及各环节间相互关联、相互制约,因此,亟需有效的工具来评估港内铁路装卸线作业系统效率。

现有研究成果主要集中在港区外铁路、集装箱货场的布置、设备配套、作业调度方面。例如,王

艳青等利用 eM-Plant 建立了铁路集装箱货场作业仿真模型并对货场布局进行研究<sup>[1]</sup>; Ballis 等建立了由专家系统、仿真模型、成本计算模型组成的分析工具,定量分析了铁路集装箱货物传统装卸工艺和先进装卸工艺的效率和效率<sup>[2]</sup>; Benna 等通过模拟不同码头布置的方案下铁路货站的装卸效率和装卸设备利用率来确定合理的码头布置方案<sup>[3]</sup>; Guo 等建立了考虑门吊安全距离、走行时间、门吊交叉等约束混合整数规划模型优化铁路集装箱场站轨道吊的调度问题<sup>[4]</sup>; Abourraja 等通过建立起重机调度多智能体仿真模型提出 Le Havre 港口集装箱货场起重机调度的改进方案<sup>[5]</sup>。对于港内铁路装卸线/场,刘学武等探讨了确定铁路集装箱装卸设施建设规模的主要条件和港内铁路装卸线的布置形式与集装

收稿日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579035); 辽宁省自然科学基金计划重点项目(20170540150); 大连市支持高层次人才创新创业项目(2016RQ024)

作者简介: 李达(1994-),男,硕士研究生,从事港口规划与系统仿真优化研究。

箱码头装卸作业的关系<sup>[6]</sup>；王玥葳定性分析了铁路进线方式对港内交通的影响<sup>[7]</sup>。

本文在分析集装箱码头铁路装卸线作业及其他作业流程的基础上，应用多智能体仿真技术建立集装箱码头铁路装卸线作业系统仿真模型，并验证了模型的有效性，为进一步研究集装箱码头铁路装卸线的布置和建设规模提供参考。

## 1 集装箱码头铁路装卸线

集装箱码头包括码头前方作业区、堆场作业区和铁路作业区等功能区，铁路作业区一般位于码头后方堆场。如图1所示，码头前沿作业区由岸桥负责集装箱船的装卸作业；堆场作业区由场桥负责集装箱的装卸、交接和临时存放等；铁路作业区由轨道吊负责列车的装卸作业和到发箱的堆存，一般布置有铁路装卸线、铁路作业区堆场、集装箱卡车（集卡）作业通道等<sup>[8]</sup>。各作业区之间水平运输机械以集卡为主。

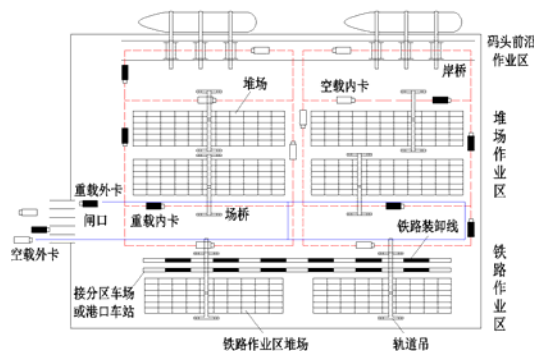


图1 典型集装箱码头布置示意

对于进港集装箱，船舶到港后，港内集卡将集装箱运至铁路装卸区，由轨道吊装车离港；或先将集装箱运至堆场暂时堆存，再运到铁路作业区装车疏港或由港外集卡疏港。对于出港集装箱，列车到港后，港内集卡空载至铁路装卸区，由轨道吊完成装箱，再运至码头前方由岸桥完成装船作业；或将集装箱运至堆场暂时堆存，再运至码头前方由岸桥装船。由此可见，在集装箱码头铁路装卸线作业过程中，船舶、岸桥、港内集卡、场桥、列车、轨道吊、港外集卡等实体都存在相互联系，作业流程相互交叉；船舶和列车到港、设备调度、集卡路线选择、装卸作业任务的选择等各行为之间存在随机性，也需要通过信息交互实现协同作业。

因此，集装箱码头铁路装卸线作业系统是由复杂随机动态物流系统和道路交通系统组成，需要建

立有效模型来描述装卸线作业与交通特征。

## 2 多智能体仿真建模

为更好地描述集装箱码头铁路装卸线作业系统的复杂性、随机性以及集卡行驶的交通特性，结合多智能体仿真建模与微观交通仿真建模技术，基于 AnyLogic 仿真软件建立了集装箱码头铁路装卸线作业系统仿真模型。模型中重要的 Main、列车、集卡等智能体的实现具体如下。

### 2.1 Main 智能体

根据集装箱码头铁路装卸线的系统特征，赋予各智能体属性，建立各个智能体之间的信息交互方式，并实现仿真模型初始化、仿真参数输入、智能体类集合、评价指标统计、仿真结果输出等功能，是整个仿真模型的控制智能体。

### 2.2 列车智能体

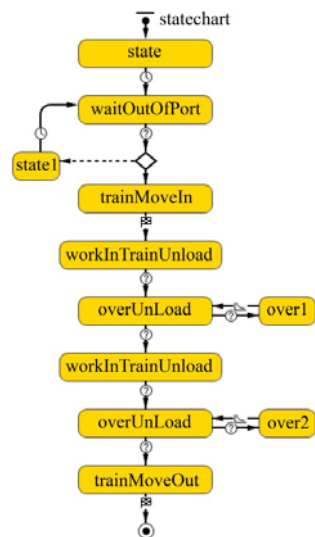


图2 列车智能体模型状态示意

如图2所示。列车到港后，如果装卸线空闲，列车驶入装卸线，状态变为“trainMoveIn”，否则在港外等待（状态为“waitOutOfPort”）直至有空闲装卸线；到达装卸线后，调用港内集卡开始卸车作业，状态变为“workInTrainUnload”，在卸车作业过程中，“over1”实时判断是否将所有出口箱卸完；卸车结束后，状态变为“overUnLoad”，并开始装车作业，状态变为“workInTrainUnload”，装箱作业过程中，由“over2”实时判断是否将所有进口箱装完；装车结束后，状态变为“overLoad”，列车离港，状态为“trainMoveOut”。

2.3 集卡智能体

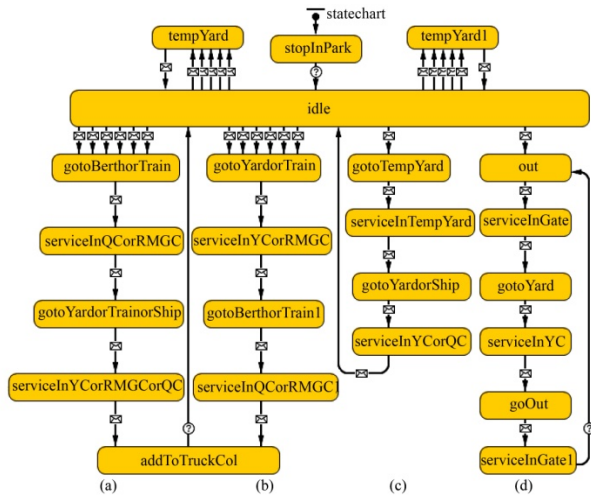


图3 集卡智能体模型状态示意

1) 港内集卡

如图 3(a), 港内集卡收到卸箱信息后, 前往泊位或铁路装卸区, 状态变为“gotoBerthorTrain”; 到达后接受岸桥或轨道吊卸箱作业, 状态变为“serviceInQCorRMGC”; 卸箱作业完成后, 根据集装箱属性确定作业区并将集装箱送至目的地, 状态变为“gotoYardorTrainorShip”; 收到服务信息, 状态变为“serviceInYCorRMGCorQC”, 由场桥卸箱至堆场, 或船舶卸下的集装箱由轨道吊装车, 或列车卸下的集装箱由岸桥装船; 完成作业的集卡驶回停车场, 状态变为“addToTruckCol”。

如图 3(b), 港内集卡收到装箱信息后, 前往堆场或铁路装卸区, 状态变为“gotoYardorTrain”; 到达后接受场桥或轨道吊装箱作业, 状态变为“serviceInYCorRMGC”; 装箱作业完成后, 根据集装箱属性确定作业区将集装箱送至目的地, 状态变为“gotoBerthorTrain1”; 收到服务信息后, 状态变为“serviceInQCorRMGC1”, 由岸桥装船, 或由轨道吊装车; 完成作业的港内集卡驶回停车场, 状态变为“addToTruckCol”。

如图 3(c), 港内集卡收到铁路堆场提箱消息后前往铁路堆场, 状态变为“gotoTempYard”; 收到服务信息后, 由轨道吊装箱到港内集卡上, 状态变为“serviceInTempYard”; 装箱作业完成后, 根据集装箱属性确定作业区将集装箱送至目的地, 状态变为“gotoYardorShip”; 收到服务消息后, 由场桥卸箱至堆场堆放, 或由岸桥装船, 状态变为“serviceInYCorQC”。

2) 港外集卡

如图 3(d), 集卡智能体在码头外生成港外集卡, 状态变为“out”, 当收到进港消息后, 港外集卡经过闸口进入堆场; 判断港外集卡是进港提箱, 还是送箱, 并由场桥完成装箱或卸箱作业, 状态变为“serviceInYC”; 港外集卡作业完成后驶向闸口, 状态变为“goOut”; 通过闸口服务, 完成离港, 状态变为“out”。

2.4 微观交通仿真模块

如图 4 所示, 借助 AnyLogic 软件, 采用多智能体和交通库混合建模的方法, 在创建集卡智能体时, 从 Source 模块中继承交通库中车辆属性, 利用 MoverTo 模块实现集卡在港区内行驶时的加速、减速、避让等特性, 以便更好地反映出铁路进港对港内交通的影响。

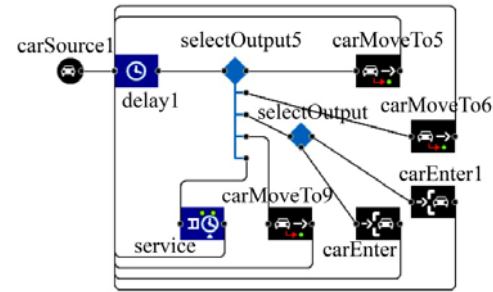


图4 微观交通模块实现

3 实例验证

为验证模型的有效性, 以某集装箱码头为例, 码头顺岸连续布置 2 个 20 万 t 级集装箱泊位, 泊位设计通过能力 125 万 TEU, 在堆场后方布置铁路装卸线, 铁路集疏运量占 20 %。根据规划和相关规范<sup>[9]</sup>, 船型比例和船舶装卸量如表 1 所示。

表 1 设计船舶比例及装卸箱量		
船舶吨级 DWT	船型比例	单船装卸总箱量
/万 t	/%	/TEU
5	45	2 000
7	25	2 100
10	20	2 400
12	4	2 800
15	3	3 200
20	3	4 000

3.1 仿真模型参数

该码头装卸船设备配置台数比例为: 岸桥:场桥:港内集卡=1:4:5;

铁路装卸线作业设备配置比例为: 轨道吊:港内

集卡=1:3。  
模型参数见表 2。

表 2 模型输入参数

智能体	参数
船舶	到港时间间隔服从 $\exp(0.65)*\text{day}$ 分布 <sup>[10]</sup>
岸桥	单箱装卸时间为三角分布(1.0, 1.5, 2.0)min
港内集卡	空载、重载速度分别为 35 km/h、25 km/h <sup>[11]</sup>
场桥/轨道吊	单箱装卸时间为三角分布(1.2, 2.0, 3.4)min
堆场	进、出口箱堆存期分别为 7 天、3 天 <sup>[9]</sup>
列车	110 TEU/车, 次送车及辅助作业时间 2 h
铁路装卸线	股数 2 条
闸口	10 条通道, 服务时间服从正态分布(1.25, 0.25)min <sup>[12]</sup>
港外集卡	提前 1~3 天进港送箱, 3~7 天进港提箱 <sup>[9]</sup>
集装箱	进、出口箱各占 50 %, 铁路集疏运占 20 %

3.2 仿真结果与分析

分别在铁路装卸线上配置 3、4、5 台轨道吊, 形成 3 种轨道吊配置方案, 运行仿真实验并统计列车装卸时间、集卡平均等待轨道吊时间和轨道吊利

用率。实验 20 次, 每次时间取 1 周, 得到仿真结果见表 3。选取码头吞吐量、公路和铁路集疏运量作为模型指标。由表 3 可知, 总吞吐量、公路和铁路集疏运量仿真结果与计算值差距在 4 %以内, 认为该模型可描述集装箱码头铁路装卸线作业系统。随着轨道吊数量的增加, 铁路装卸线效率将会提高, 列车装卸时间、集卡平均等待轨道吊时间均减少, 但轨道吊利用率也降低, 这与实际运营经验相一致, 说明该模型能很好地反应上述参数变化趋势。另外, 列车装卸时间要比文献[6]中的计算值要大, 这是因为集装箱码头铁路装卸线作业受其他作业子系统影响, 而该模型能较真实地描述集装箱码头铁路装卸线作业系统与其他子系统的相互协调与相互影响, 因此该模型可为研究集装箱码头铁路装卸线布置、装卸工艺方案等提供参考。

表 3 仿真实验结果汇总

方案	轨道吊 数量 /台	码头周吞吐量		铁路集疏周运量		公路集疏周运量		列车装 卸时间 /min	集卡平均等待 轨道吊时间 /s	轨道吊 利用率 /%
		/TEU	误差/%	/TEU	误差/%	/TEU	误差/%			
1	3	23196	3.24	4785	0.19	19058	0.62	172	238	38
2	4	23214	3.16	4785	0.19	19100	0.40	131	203	29
3	5	23165	3.37	4786	0.17	19081	0.50	108	173	23

注: 计算码头吞吐量、铁路集疏运量、公路集疏运量分别为 239 72 TEU/周、4 794 TEU/周、19 177 TEU/周。

4 结 语

本文针对集装箱码头铁路装卸线作业系统的特点, 利用多智能体仿真技术和微观交通仿真技术, 建立了集装箱码头铁路装卸线作业系统仿真模型。实例表明该模型能模拟码头铁路装卸线生产作业过程, 可为集装箱码头铁路装卸线布置、装卸工艺方案等提供参考。

参考文献:

[1] 王艳青, 程文明, 张则强. 基于eM-Plant的铁路集装箱货场装卸系统仿真研究[J]. 起重运输机械, 2008, (12): 7-12.  
[2] Ballis A, Golias J. Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2002, 36(7): 593-611.  
[3] Benna T, Gronalt M. Generic simulation for rail-road container terminals[C]//Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. 2008: 2656-2660.  
[4] Guo Peng, Cheng Wenming, Zhang Zeqiang. Gantry

Crane Scheduling with Interference Constraints in Railway Container Terminals[J]. International Journal of Computational Intelligence, 2012.  
[5] Abourraja M N, Oudani M, Samiri M Y, et al. A Multi-Agent Based Simulation Model for Rail-Rail Transshipment: An Engineering Approach for Gantry Crane Scheduling[J]. IEEE Access, 2017, (99).  
[6] 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(04): 20-22.  
[7] 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]. 清华大学, 2010.  
[8] 郭子坚. 港口规划与布置[M]. 第三版. 人民交通出版社, 2011.  
[9] 中华人民共和国交通运输部. JTS 165-2013 海港总体设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.  
[10] 徐灵杰. 集装箱班轮到港规律的概率分布及其特性研究[D]. 大连海事大学, 2014.  
[11] 周强, 肖矫矫, 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, (04): 487-490.  
[12] 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]. 大连理工大学, 2016.