

客货滚装码头作业系统智能体微观仿真建模

赵晓艺¹, 唐国磊^{*1}, 宋向群¹, 于菁菁¹,
于旭会¹, 齐越², 王志斌³, 李达¹, 张勇¹

(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: 鉴于沿海客货滚装码头作业系统属于复杂随机动态物流系统和道路交通系统, 难以用数学方法进行有效描述, 综合应用智能体建模技术和微观交通仿真技术, 建立客货滚装码头作业系统智能体微观仿真模型, 对其生产作业流程和交通流进行模拟. 本模型可获得土地利用、作业效率、旅客安全、绿色生态等定量指标, 用于定量评估客货滚装码头陆域布局方案、生产作业调度等. 实例证明, 客货滚装码头作业系统智能体微观仿真模型可用于定量评价客货滚装码头规划与布置方案的关键指标, 从而为客货滚装码头规划与布置方案优化提供参考.

关键词: 综合交通运输; 系统仿真模型; 智能体; 客货滚装码头; 微观交通

中图分类号: U651.4

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201901010

0 引言

客货滚装码头是兼顾旅客、车辆和货物滚装运输的重要节点, 是旅客、车辆的聚集区域, 存在着旅客、车辆相互交叉、拥堵等现象, 易引起安全事故与环境污染^[1]. 随着客货滚装运输业的快速发展和客货滚装船舶的大型化, 单航次运输的旅客及车辆也越来越多, 因人流拥挤、车辆拥堵而发生安全事故的可能性增加, 环境污染也会加重. 因此, 在节约集约利用岸线、土地资源, 加强生态环保, 提升安全水平的建设要求下, 考虑到客货滚装码头作业系统属于复杂随机动态物流系统和道路交通系统, 亟须建立有效的模型描述客货滚装码头作业系统, 以获得定量指标, 为规划与运营提供决策支持.

目前有关滚装码头生产作业的研究相对较少^[1], 主要集中于货物/汽车滚装码头的作业调度及其离散事件仿真建模等研究. 例如, Keceli 等应用 Arena 软件建立货物滚装码头离散事件仿真模型, 以识别伊斯坦布尔滚装码头作业的瓶颈^[2]; Lättilä 等建立货物滚装作业仿真模型以预测长

期的港口需求^[3]. 而客货滚装码头研究多集中于码头服务水平评价与安全风险分析等, 例如, 刘肆轶对大连客货滚装行业服务质量与顾客满意、顾客忠诚关系进行分析^[4]; Mabrouki 等运用层次分析法分析评价客货滚装码头运营过程中的作业风险并提出保障措施^[5]. 此外, 考虑到客货滚装码头作业是一个随机动态物流系统, 部分研究也开始应用计算机仿真技术模拟客货滚装码头作业过程及交通行为, 研究客货滚装码头停车场规模、码头前沿区域布置等问题. 例如, Balaban 等探讨了仿真在货物滚装/客滚码头管理的应用前景^[6]; 王秉昌应用 Vissim 软件模拟客滚车辆进出港过程, 分析了车辆到港规律、船舶载车量等对港区停车场规模的影响^[7]; 王志斌等对客滚码头前沿功能区布置及交通组织进行仿真研究^[8]. 客货滚装码头除具备货物滚装码头的装卸滚装车辆的功能外, 还需为大量旅客进出、上下船提供足够的空间^[6], 因此, 在仿真建模过程中不仅要实现车辆的进出港作业过程及交通行为, 还应考虑旅客的交通行

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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: 赵晓艺(1995-), 女, 硕士生, E-mail: zhaoxiaoyi@mail.dlut.edu.cn; 唐国磊*(1980-), 男, 博士, 副教授, E-mail: tangguolei@dlut.edu.cn.

为及旅客与车辆之间的交通冲突,以有效地描述客货滚装码头作业系统的复杂随机动态物流过程与微观交通流。

为此,本文基于智能体建模技术与微观交通仿真技术,建立沿海客货滚装码头作业系统智能体微观仿真模型,模拟客货滚装码头生产作业流程和微观交通流,获得土地利用、作业效率、旅客安全、绿色生态等定量指标,为客货滚装码头功能区布置等提供决策支持。

1 问题描述

客货滚装码头服务对象众多,包括客货滚装船舶、进出港旅客、滚装车辆和港内摆渡车;对应的功能区包括港口大门、安检大厅、检前及检后停车场、车辆待渡区、码头前沿区域等。图 1 为客货滚装码头作业流程图,它描述了从客货滚装船到港,旅客、滚装车辆下船离港,到随机到港的旅客、滚装车辆登船离港的整个作业流程。

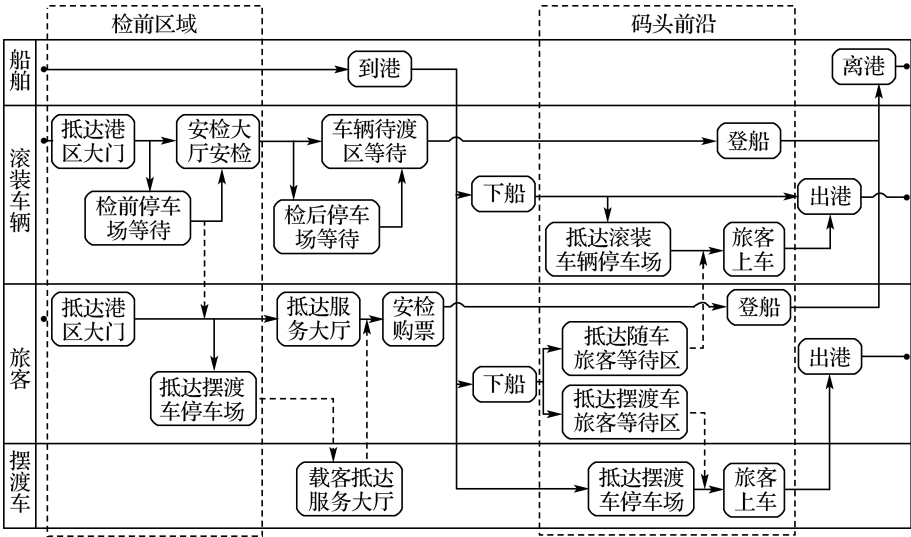


图 1 客货滚装码头作业流程图

Fig. 1 The flow chart of Ro-Pax terminal operation

从图 1 横向来看,船舶、滚装车辆、旅客和摆渡车具有较强的自主性,有各自相对独立的作业流程线。但从图 1 纵向来看,各作业流程间在时间、空间上存在联系与冲突。例如,在时间上,乘坐随行车辆的旅客需等待随行车辆同时出港,乘摆渡车出港的旅客与摆渡车同时到达港外,因此,各流程在时间上的协调有助于提高港口作业效率;在空间上,码头前沿区域为旅客上下船或等待乘车出港提供活动区域,该区域内旅客在摆渡车站周围排队等待上车,而乘坐随行车辆的旅客在前沿区域寻找随行车辆,会产生交通混乱和冲突^[1],易发生车辆拥堵、剐蹭旅客等安全事故。此外,旅客、滚装车辆到港以及旅客、滚装车辆下船还具有明显的随机性。

可见,客货滚装码头作业系统是复杂的随机动态物流系统与道路交通系统的融合,难以用数

学方法对其进行有效描述,亟须建立有效模型,直观描述生产作业的各个环节及各类实体间的交互与冲突,以评估客货滚装码头生产作业系统。

2 仿真模型

根据客货滚装码头生产作业的复杂性、随机性以及微观交通等特征,本文采用智能体建模、离散事件建模和微观交通仿真相结合的方式,应用 AnyLogic 软件^[9-10]建立客货滚装码头作业系统仿真模型(MAS-RPOS),其总体结构见图 2。

该仿真模型包括主智能体(Main_Agent)、客货滚装船智能体(Ro_Pax_Ship_Agent)、车辆智能体(Vehicle_Agent)、旅客智能体(Passenger_Agent)等 4 类智能体,各智能体实现过程如下。

2.1 主智能体

主智能体是仿真模型的控制智能体,主要实

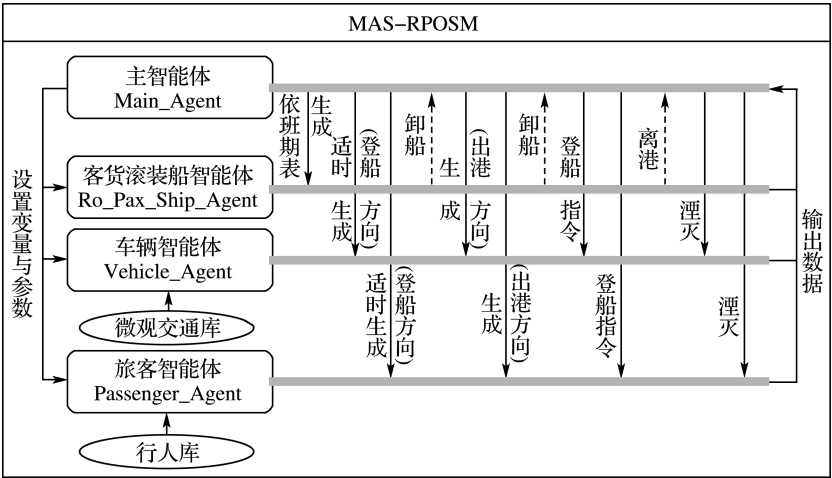


图 2 客货滚装码头作业系统仿真模型总体框架

Fig. 2 The framework of Ro-Pax terminal operation system simulation model

现以下功能：根据总平面布置方案生成码头功能区位置与规模、仿真边界条件以及港内交通路网，并记录各自使用状况；设置客货滚装船班期表，生成对应吨级、实载率的到港客货滚装船智能体；设置登船车辆、旅客的随机到港概率分布，生成登船车辆、旅客智能体；统计分析土地利用、作业效率、旅客安全、绿色生态等定量指标。

2.2 客货滚装船智能体

客货滚装船智能体模拟船舶从到港、卸船、装船到离港过程中的各种行为，其状态变迁过程见图 3。客货滚装船智能体由主智能体生成，在“船舶抵达”状态初始化船舶属性，并适时触发主智能体生成以该船舶为目标的登船车辆智能体 (Vehicle_Agent) 和旅客智能体 (Passenger_Agent)；客货滚装船到港后由“锚泊”至“靠泊”状

态控制完成航道航行、回旋水域调头和靠泊作业；“卸船装船”状态下开始先卸后装作业，即收到卸船消息后，生成相应数量的出港车辆智能体和旅客智能体并各自完成卸船作业；收到装船消息后，触发登船车辆智能体和旅客智能体开始登船作业；收到离港消息后，客货滚装船经过“离泊”“掉头 2”“离港”等状态离开港口。

2.3 车辆智能体

为描述车辆微观行为以及人与车、车与车之间的冲突，车辆智能体由 AnyLogic 智能体建模与微观交通库实现，即微观交通库实现车辆在港内道路、停车场等的驾驶行为，如跟驰、换道、并道、驻车等 (见图 4)，并根据自己的状态判断进入下一步的流程模块；而智能体模拟在码头生产作业过程中车辆的行为或属性改变，实现进出港私家车、滚装车辆、摆渡车的不同行为，其状态图见图 5。

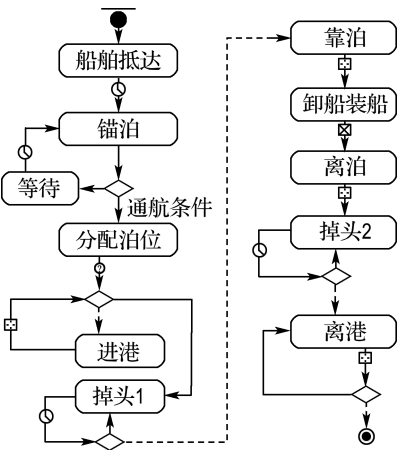


图 3 客货滚装船智能体状态图

Fig. 3 The state chart of Ro_Pax_Ship_Agent

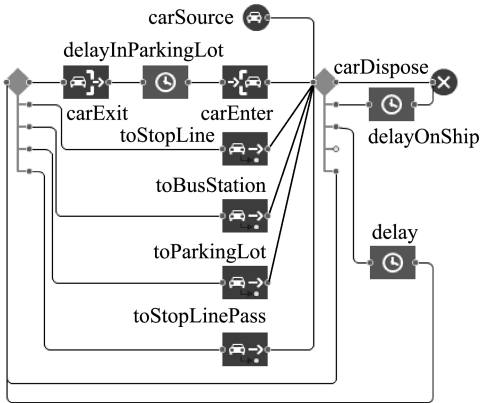


图 4 车辆行为模块

Fig. 4 Modules of vehicle behaviors

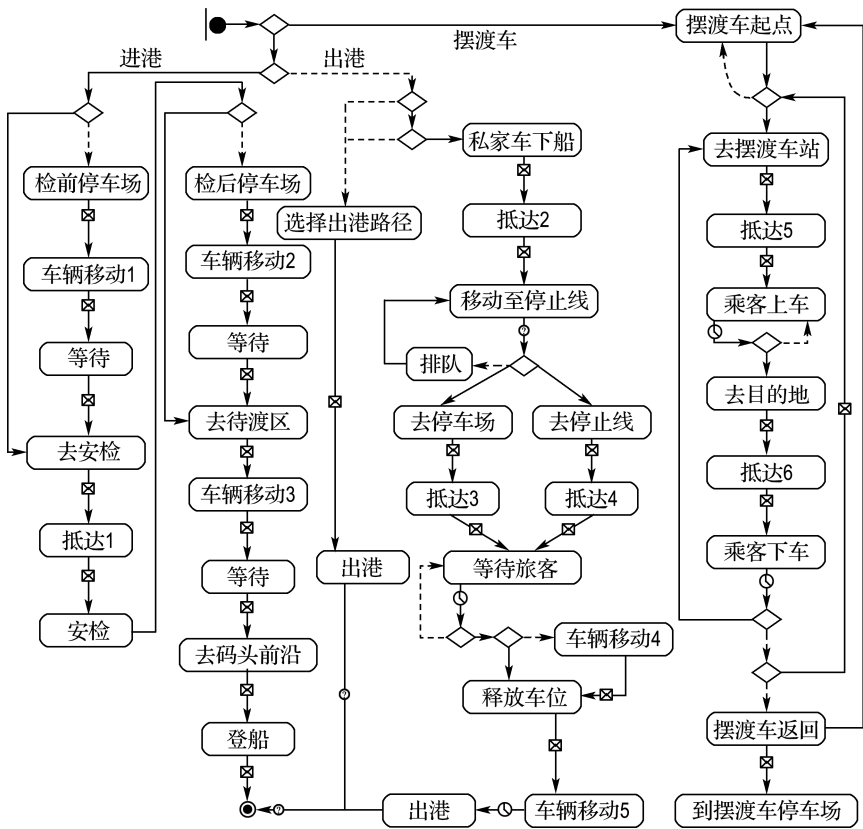


图 5 车辆智能体状态图

Fig. 5 The state chart of Vehicle_Agent

在进港流程中,按照安全管理要求只有私家车、滚装车辆的司机允许驾驶车辆进入客货滚装船,而随车旅客不得随私家车、滚装车辆一起登船,因此,私家车、滚装车辆等进港流程基本一致.进港车辆智能体到港后,根据安检大厅排队情况、目标船舶班期时间等判断是否前往检前停车场等待.若需要则前往检前停车场(“检前停车场”状态),否则直接前往安检大厅(“去安检”状态)安检.通过安检后,若车辆待渡区未开放,滚装车辆前往检后停车场等待(“检后停车场”状态),否则直接进入车辆待渡区(“去待渡区”状态),实时判断登船窗口开启后登船.

在出港流程中,有随车旅客的车辆需在码头前沿停车载客,而无随车旅客的车辆则直接出港.因此,出港车辆流程应根据是否有随车旅客而定.出港车辆卸船,若没有随车旅客,则由“选择出港路径”和“出港”状态选择出港路线直接出港;如果有随车旅客,则由“私家车下船”控制驶向码头前沿停车场(“去停车场”状态)或停车线(“去停止线”状态)排队等待随车旅客(“等待旅客”状态),

待旅客全部上车后,释放停车场(“释放车位”状态)并出港.

港内摆渡车服务于旅客进出港,有别于其他车辆.当摆渡车收到服务消息后,由“摆渡车起点”状态进入“去摆渡车站”状态前往接车站;到达车站后等待(“乘客上车”状态)直至摆渡车达到载客量或无旅客上车时,摆渡车前往旅客下车车站(“去目的地”状态),并等待所有旅客下车(“乘客下车”状态),完成接送任务.如果服务泊位或其他泊位仍有服务需求,则重复任务,否则由“摆渡车返回”状态控制返回原停车场,回到空闲状态.

2.4 旅客智能体

为反映旅客行为的自主性、与其他行人及边界的距离、吸引效果等,旅客智能体基于智能体建模与行人库实现,即行人库实现旅客连续空间移动、等待、排队等行为,见图 6;而智能体模拟在客货滚装码头作业过程中旅客的行为或属性改变,其状态图见图 7.

对于进港旅客,除司机驾车登船外,其他旅客均进入候船厅等待登船.如图 7 所示,进港旅客智

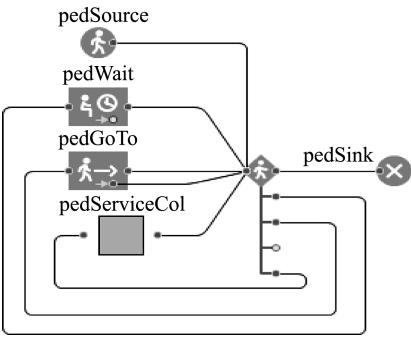


图 6 行人行为模块

Fig. 6 Modules of passenger behaviors

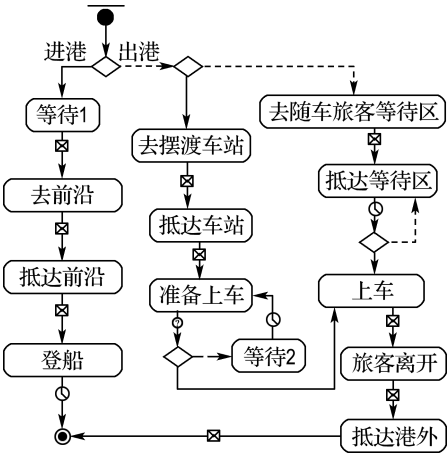


图 7 旅客智能体状态图

Fig. 7 The state chart of Passenger_Agent

能体到港后在候船厅等待(“等待 1”状态),收到登船信息后,主智能体发出摆渡车服务请求,旅客检票后至摆渡车旅客等待区排队等待;摆渡车到达后乘摆渡车到达码头前沿沿车站(“抵达前沿”状

态)并上船(“登船”状态). 对于出港旅客,其流程取决于是否有随行车辆. 收到卸船信息后,主智能体发出摆渡车服务请求. 与此同时,乘坐私家车、滚装车辆等出港的旅客,下船步行至随车旅客等待区(“去随车旅客等待区”状态),其余旅客步行至摆渡车旅客等待区(“去摆渡车站”状态). 旅客进入等待状态直至随行车辆或摆渡车到达,上车(“上车”状态)跟随对应车辆出港.

3 应用实例

某沿海客货滚装码头规划建设 6 个客货滚装泊位,包括 3 个 30 000 GT 泊位(1#、4#和 5#)、1 个 20 000 GT 泊位(6#)及 2 个 10 000 GT 泊位(2#和 3#),该码头陆域平面布置初始方案见图 8.

3.1 仿真参数

各泊位班期为 2 班/d,船舶属性见表 1;旅客上下船速度取每闸口 20~30 人/min,行走速度服从[0.5 m/s, 1.0 m/s]上的均匀分布^[11];大型货车占总车辆数的比例服从[20%, 30%]上的均匀分布;车辆登船速度取 2~5 辆/min,下船速度取 4~10 辆/min,港内最高行驶速度取 30 km/h^[11];安检效率及摆渡车参数见表 2.

3.2 初始方案评估

运行仿真模型获得初始方案评价指标(表 3),以及码头前沿行人密度图(图 9(a)). 通过分析仿真结果,可得出以下结论:

(1)土地利用:车辆待渡区利用率较低,最高为 19.9%. 单独布置车辆待渡区造成土地资源浪费.

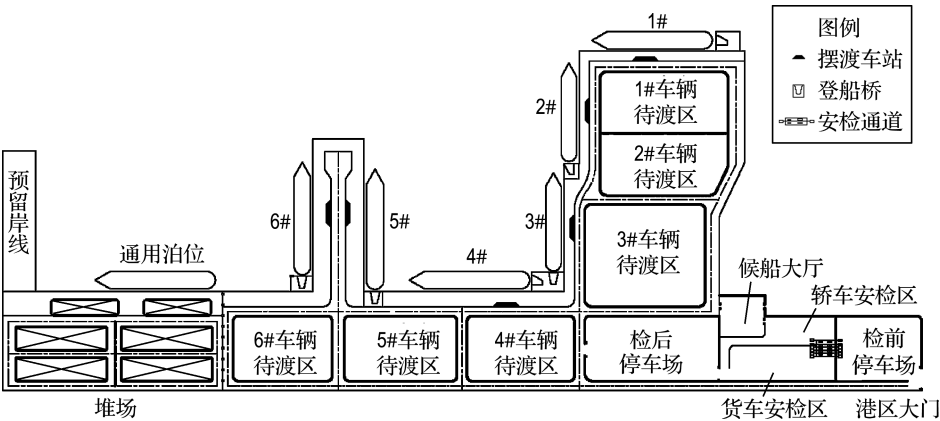


图 8 客货滚装码头陆域平面布置初始方案

Fig. 8 Initial landside layout plan of the Ro-Pax terminal

表 1 客货滚装船属性
Tab.1 Properties of Ro-Pax ships

吨级/GT	额定载车辆	额定载客量/10 ³
3×10 ⁴	300	2.0
2×10 ⁴	200	1.1
1×10 ⁴	100	0.6

表 2 安检大厅及摆渡车参数
Tab.2 Parameters of security check hall and shuttle buses

车辆安检时间/s			单艘船舶摆渡 车服务数量上限	摆渡车载 客容量
大型	中型	小型		
N(120,12)	N(90,9)	N(60,6)	3	60

表 3 初始方案仿真结果
Tab.3 Simulation results of initial plan

泊位	土地利用		作业效率				旅客安全	绿色生态			
	待渡区需求/10 ³ m ²	待渡区利用率/%	旅客疏港用时/min	车辆疏港用时/min	出港摆渡车旅客在港时间/min	出港随车旅客在港时间/min	旅客密集(>4 人/m ²) 区域面积/m ²	进港汽车日均碳排放量/kg	进港货车日均碳排放量/kg	出港汽车日均碳排放量/kg	出港货车日均碳排放量/kg
1#	6.9	19.9	112.5	79.8	42.8	33.2	72.0	196.4	118.8	492.1	28.5
2#	2.4	6.6	35.8	26.2	11.2	9.7	19.0	60.8	37.5	52.7	11.6
3#	2.3	6.7	28.9	26.5	9.1	10.6	24.0	60.1	36.7	61.4	10.3
4#	6.8	19.9	101.2	73.3	36.3	32.8	70.0	206.6	123.8	480.0	32.2
5#	6.9	19.8	111.3	66.3	35.5	27.1	79.0	220.7	133.7	407.0	42.1
6#	4.4	13.2	65.7	49.6	22.1	19.8	62.0	143.1	86.6	195.8	28.9

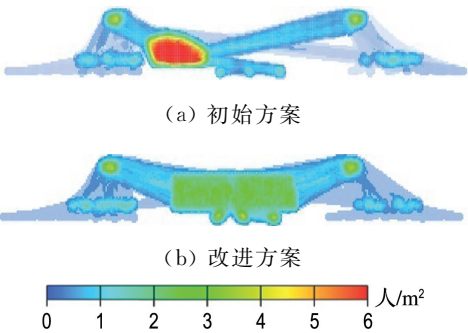


图 9 1#泊位码头前沿行人密度图
Fig.9 Pedestrian density map in the apron area of berth 1#

3.3 改进方案评估

基于以上分析,对码头布局和运营方案提出如下改进措施:

- (1)30 000 GT 泊位摆渡车服务数量增为 4 辆;
- (2)码头前沿区域进行精细化布置,车辆待渡区两两合并,见图 10;

(2)作业效率:30 000 GT 泊位疏港总用时较大;旅客疏港时间是总疏港时间的控制因素,乘摆渡车旅客的出港速度直接影响港口的作业效率.

(3)旅客安全:码头前沿行人密度大于 4 人/m² 的总面积高于 300 m²,出现较为严重的旅客拥挤现象.以 1#泊位为例(图 9(a)),该区域行人密度最高可达 6 人/m²,发生人员安全事故概率较大.

(4)绿色生态:出港汽车的日均碳排放量明显高于其他类型车辆.原因在于汽车数量在总车辆中所占比例较高,以及部分出港私家车需要在码头前沿等待旅客上车,且在此期间车辆不熄火.因此,控制车辆尤其是私家车在港时间,可以促进港口低碳绿色发展.

(3)摆渡车旅客等待区域内实行两列迂回排队组织.

运行仿真模型得到改进方案评价指标,与初始方案对比(表 4)可知:待渡区需求降低约 30%,土地利用率高 1 倍;旅客疏港总用时减少 34%;码头前沿行人密度均值降为 2~3 人/m² (图 9(b)),旅客密集区域面积减少 77%;出港车辆日均碳排放总量可降低约 360 kg.因此,改进方案在上述各方面均有较大的改善.

从仿真结果分析可知,为实现港区绿色、安全、高效发展,应对码头前沿区域进行精细化布置和合理的交通组织;不同泊位共享车辆待渡区,能提高待渡区利用率,从而减少港区总面积,节约集约利用土地;增加摆渡车服务数量可以有效提高码头作业效率,但同时会增加码头运营成本,在港区实际运营中,应根据船舶规模和实载率安排摆渡车服务数量,以达到在节约成本的同时提高作业效率的目的.

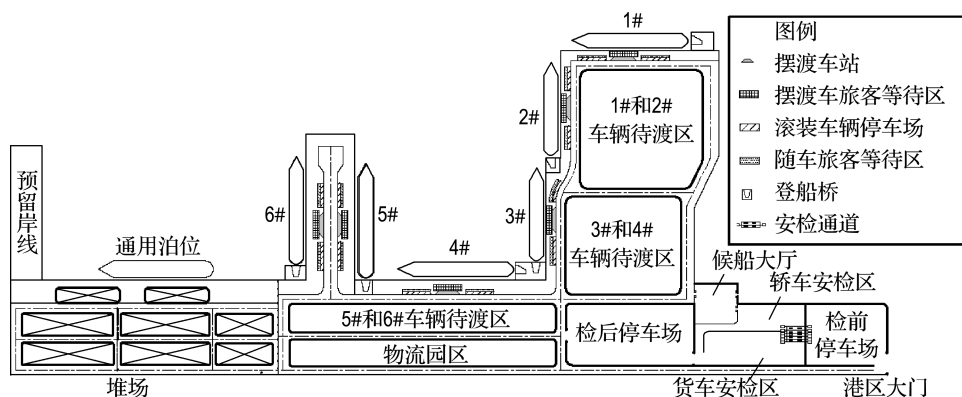


图 10 改进方案示意图

Fig. 10 Diagram of the improved plan

表 4 初始与改进方案仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results for initial and improved plan

方 案	土地利用		作业效率				旅客安全	绿色生态			
	待渡区 需求/	待渡区 利用率/	旅客疏 港用时/	车辆疏 港用时/	出港摆渡车 旅客在港	出港随车 旅客在港	旅客密集 (>4 人/m ²)	进港汽车 日均碳排	进港货车 日均碳排	出港汽车 日均碳排	出港货车 日均碳排
	10 ³ m ²	%	min	min	时间/min	时间/min	区域面积(m ²)	放量/kg	放量/kg	放量/kg	放量/kg
初始方案	29.7	14.3	75.9	53.6	26.2	22.2	326.0	887.6	537.1	1.7×10 ³	153.5
改进方案	21.0	28.6	50.0	50.0	13.6	18.2	75.0	871.2	513.2	1.3×10 ³	156.5

综上,该仿真模型可有效模拟客货滚装码头作业系统,获取一系列量化指标,成为识别客货滚装码头作业系统瓶颈的有效工具,并可为客货滚装码头平面布置及运营方案优化提供决策支持.

4 结 语

本文通过分析客货滚装码头生产作业的各个环节,应用智能体建模技术和微观交通仿真技术,建立沿海客货滚装码头作业系统智能体微观仿真模型,并应用 AnyLogic 平台的行人库和道路交通库,有机地将行人、车辆等各类实体的交通特征及实体间的交通冲突融入客货滚装生产作业模型中。应用该模型对某沿海客货滚装码头作业系统进行仿真模拟,利用仿真模型所得定量指标评估码头陆域布局方案、生产作业调度,提出优化方案,并对比证明了优化措施的有效性。因此,本模型可有效模拟客货滚装码头复杂的生产作业与道路交通特性,并定量评价港口规划与布置方案的关键指标,识别码头的作业瓶颈,为客货滚装码头平面布置方案和交通组织优化提供决策支持。另外,未来可在本模型基础上实现客运站、港口大门等作业系统仿真模拟,以定量分析港口大门处的交通流量及交通组织,进一步研究港口运营对港

口集疏运道路乃至城市道路的影响,为港口集疏运系统规划提供决策支持。

参考文献:

- [1] IANNONE R, MIRANDA S, PRISCO L, *et al.*. Proposal for a flexible discrete event simulation model for assessing the daily operation decisions in a Ro-Ro terminal [J]. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 2016, **61**:28-46.
- [2] KECELI Y, AKSOY S, AYDOGDU Y V. A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations [J]. **International Journal of Logistics Systems and Management**, 2013, **15**(4): 338-358.
- [3] LÄTTILÄ L, HILMOLA O P. Forecasting long-term demand of largest Finnish sea ports [J]. **International Journal of Applied Management Science**, 2012, **4**(1):52-79.
- [4] 刘肆轶. 大连客货滚装行业服务质量与顾客满意、顾客忠诚关系研究 [D]. 大连:大连交通大学, 2010.
LIU Yiyi. Research on the relationship of Dalian Ro-Ro industry service quality, customer satisfaction and customer loyalty [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

- [5] MABROUKI C, BENTALEB F, MOUSRIJ A. A decision support methodology for risk management within a port terminal [J]. **Safety Science**, 2014, **63**:124-132.
- [6] BALABAN M, MASTAGLIO T. RoPax/RoRo: Exploring the use of simulation as decision support system [C] // **OCEANS 2013 MTS/IEEE — San Diego: An Ocean in Common**. Washington D C: IEEE Computer Society, 2013:6741309.
- [7] 王秉昌. 客滚港区停车场规模仿真研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2014.
WANG Bingchang. The simulation study on parking scale of Ro port [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 王志斌,唐国磊,宋向群,等. 客滚码头前沿功能区布置及交通组织仿真优化 [J]. 水运工程, 2017(7):118-122.
WANG Zhibin, TANG Guolei, SONG Xiangqun, *et al.* Simulation optimization of function zone arrangement and traffic organization in Ro-Pax terminal apron [J]. **Port & Waterway Engineering**, 2017(7):118-122. (in Chinese)
- [9] LI Bin, LI Wenfeng, ZHANG Yu, *et al.* Modeling and simulation of yard trailer dispatching at container terminals [C] // **Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2009**. Washington D C: IEEE Computer Society, 2009:29-34.
- [10] YATSKIV I, SAVRASOV S, GROMULE V, *et al.* Passenger terminal safety: simulation modelling as decision support tool [J]. **Procedia Engineering**, 2016, **134**:459-468.
- [11] 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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design Code of General Layout for Sea Ports: JTS 165-2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)

Agent-based microscopic simulation modeling of Ro-Pax terminal operation system

ZHAO Xiaoyi¹, TANG Guolei^{*1}, SONG Xiangqun¹, YU Jingjing¹, YU Xuhui¹,
QI Yue², WANG Zhibin³, LI Da¹, ZHANG Yong¹

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

Abstract: The operation system of coastal Ro-Pax terminal is a complex stochastic dynamic logistics system and traffic system, which is difficult to be described effectively by mathematical methods. Therefore, an agent-based microscopic simulation model of Ro-Pax terminal operation system is built using the agent modeling technology and microscopic traffic simulation technology to simulate the operation flow and traffic flow. This model can determine land utilization, operation efficiency, passenger safety, green ecology and other quantitative indicators, which can be used to evaluate the landside layout plan of Ro-Pax terminal and production scheduling quantitatively. The example proves that this agent-based microscopic simulation model of Ro-Pax terminal operation system can evaluate the key index of the planning and layout plan of the Ro-Pax terminal quantitatively so as to provide a reference for the optimization of the planning and layout plan of the Ro-Pax terminal.

Key words: integrated transportation; system simulation model; agent; Ro-Pax terminal; microscopic traffic