



基于多智能体仿真的自动化集装箱码头 合理通过能力研究^{*}

梁辰¹, 唐国磊¹, 于菁菁¹, 齐越², 宋向群¹, 于旭会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)

摘要: 针对自动化集装箱码头泊位合理通过能力评估问题, 基于多智能体仿真建立采用“双小车岸桥(DTQC)+自动导引车(AGV)+自动化轨道吊(ARMG)”工艺的自动化集装箱码头装卸作业模型, 对顺岸布置的自动化码头通过能力与码头服务水平、泊位数量之间的关系进行研究。仿真结果表明: 码头服务水平(AWT/AST)与泊位通过能力呈明显负相关关系, 且在一定码头服务水平下, 泊位合理通过能力随顺岸式码头泊位数量的增加显著提高。基于仿真结果进行公式拟合, 提出了自动化集装箱码头的泊位合理通过能力估算方法, 可以为自动化集装箱码头规划与运营提供决策支持。

关键词: 自动化集装箱码头; 多智能体仿真; 泊位通过能力; 码头服务水平

中图分类号: U 651⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2018)10-0177-06

Evaluation of reasonable berth throughout capacity of automated container terminals based on multi-agent simulation modeling

LIANG Chen¹, TANG Guo-lei¹, YU Jing-jing¹, QI Yue², SONG Xiang-qun¹, YU Xu-hui¹

(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)

Abstract: To estimate the reasonable berth throughout capacity of automated container terminal, this paper proposes a multi-agent based on simulation model of automated container terminal operation system to study the relationship among the throughout capacity of automated container terminal, port service level and the number of berths. The model adopts the technology of “double trolley bank bridge (DTQC) + automatic guide vehicle (AGV) + automatic rail crane (ARMG)”. The simulation results show that AWT/AST has a significant negative correlation with berth throughput, and under a certain service level, berth throughput increases significantly with the increase of the number of berths along the shore. Based on the simulation results, the method of berth passing capacity estimation for automated container terminals is proposed, which can provide decision support for the planning and operation of automated container terminals.

Keywords: automated container terminal; multi-agent simulation; berth throughout capacity; port service level

收稿日期: 2018-01-24

^{*} 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: 梁辰(1992—), 男, 硕士研究生, 从事港口规划与系统仿真优化研究。

快速发展的海上运输业对港口服务能力提出更高需求,自动化码头能够有效地降低劳动强度、提升作业效率、促进节能减排和保障安全生产,是集装箱港口的发展趋势^[1]。目前世界上已建成诸多大型自动化集装箱码头,例如青岛港全自动化集装箱码头、上海国际航运中心洋山深水港区四期工程等。港口泊位通过能力是港口在外部环境一定条件下的生产能力,是衡量港口服务能力的重要指标,在港口规划与运营中起着非常重要的作用。由于自动化码头采用“双小车岸桥+自动导引车+自动化轨道吊”等装卸工艺与装卸机械,有别于我国传统集装箱码头的装卸工艺和装卸机械,其通过能力评估无法通过成熟的经验公式估算^[2-3]。因此,对自动化集装箱码头运营时不同条件下的泊位通过能力和码头服务水平(AWT/AST)之间的关系进行研究,从而确定泊位合理通过能力,对于提升港区效率、优化泊位布置、提高港口服务水平等具有十分重要的意义。

目前主要使用排队论^[4-5]、离散事件仿真^[6-10]研究传统集装箱码头通过能力和相关影响因素^[11-15]。例如Wang等采用随机Petri网的层次模型方法建立传统集装箱码头通过能力动态模型来确定码头作业瓶颈;Wu等通过建立香港葵涌集装箱码头驳船泊位仿真模型研究泊位靠泊能力和码头服务水平之间的相互关系;Ding等通过仿真研究不同到港船型组合对集装箱码头通过能力的影响;NG等对码头在不同船舶密度下的泊位通过能力进行了分析。此外,Liu等通过离散事件仿真对采用不同装卸工艺的自动化集装箱码头作业进行比较研究;程泽坤等对洋山港四期自动化码头的装卸工艺和总体布置^[16]进行了研究。

集装箱码头通过能力与港区作业息息相关,采用“双小车岸桥+自动导引车+自动化轨道吊”

装卸工艺的主流自动化集装箱码头作业系统具有复杂的动态随机性。为评估自动化集装箱码头合理通过能力,本文的研究重点在于利用多智能体技术和微观交通仿真技术建立自动化集装箱码头装卸作业系统仿真模型,在微观上模拟自动化集装箱码头作业全流程并给出了仿真模型的体系结构及关键技术。通过对采用顺岸式布置的自动化集装箱码头装卸作业进行仿真试验,得到的不同泊位数的顺岸式自动化码头的服务水平指标(AST/AWT)和其对应的泊位平均通过能力之间的相互关系,并探究其中的规律和特征,提出估算自动化集装箱码头泊位合理通过能力的方法,为研究自动化集装箱码头作业和规划布置提供决策支持。

1 自动化集装箱港口泊位合理通过能力

集装箱港口的泊位通过能力是指一个泊位在一定时间内能够装卸船舶所载货物的额定数量,是进行港口规划、泊位布置的重要参考指标,通常在规划阶段依据《海港总体设计规范》泊位设计通过能力公式进行计算,对于成熟的传统集装箱码头装卸工艺系统,这些经验公式具有好的评估效果。

对于我国新出现的自动化集装箱港口,主要采用“双小车岸桥(DTQC)+自动导引车(AGV)+自动化轨道吊(ARMG)”的全自动化装卸工艺^[17](图1),与传统码头在作业效率和作业环节的相互影响上存在很大区别。因此,本文以“DTQC+AGV+ARMG”的全自动化装卸工艺为研究对象,采用码头服务水平(AWT/AST)作为衡量泊位通过能力是否合理的指标^[18],对自动化集装箱港口的泊位合理通过能力进行界定。其中,AWT代表所有到港船舶的平均等待时间,AST代表正常情况下所有船舶在港内的平均装卸作业时间。

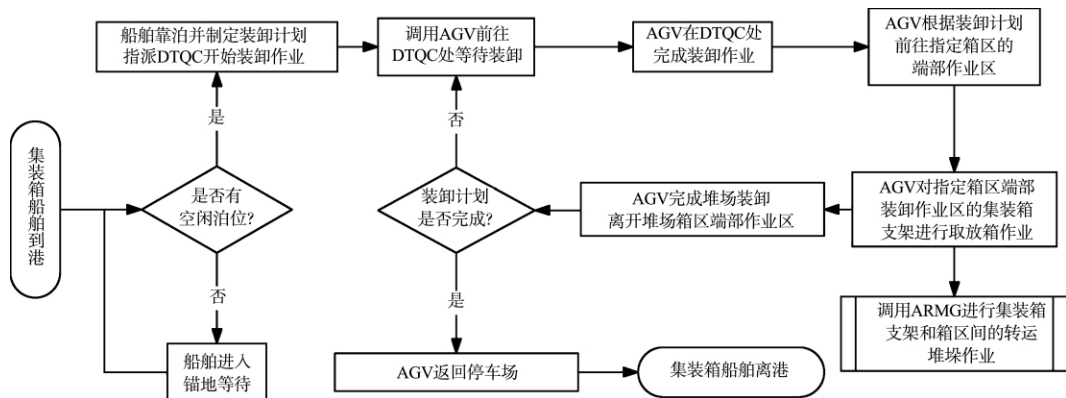


图 1 自动化集装箱码头作业逻辑模型

2 自动化集装箱码头装卸作业微观仿真模型

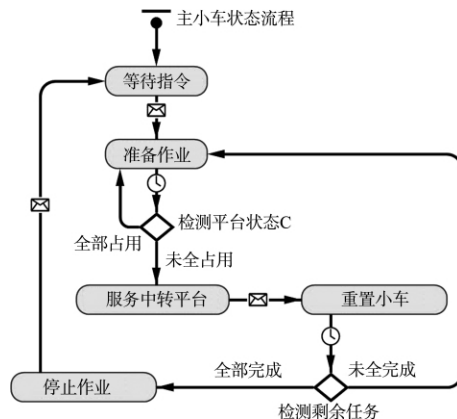
如图 1 所示, 自动化集装箱码头作业系统是由复杂随机动态物流系统和道路交通系统组成, 为此, 本文基于 AnyLogic 软件, 综合应用多智能体建模和离散事件建模方法构建微观仿真模型, 模拟自动化集装箱码头装卸作业流程与交通特征。该模型主要实现的智能体包括主智能体、集装箱船舶智能体、泊位智能体、DTQC 智能体、ARMG 智能体和 AGV 智能体, 具体为:

1) 主智能体是仿真模型的控制智能体, 它构成模型运行的外部环境并定义仿真模型中的初始参数和边界条件。其中主要实现的功能有: 根据方案生成堆场箱区布置、车场及大门位置、交通路网以及港内机械配置; 记录模型运行过程中数据指标和状态变化。

2) 集装箱船舶智能体模拟集装箱船舶从到港到完成装卸作业后离港整个过程中的各项行为。首先, 船舶按照事先设定的到港规律产生, 并定义吨级、主尺度及装卸量; 之后由主智能体为该船分配目标泊位, 船舶智能体与泊位智能体通过信息交互确定泊位状态, 如果泊位被占用则在锚地中等待, 待至目标泊位空闲后进港进行靠泊作业, 向泊位智能体传递装卸任务并开始进行装卸船作业; 最后, 完成作业后, 该船舶智能体离开泊位, 并将船舶信息记录在主智能体内。

3) 泊位智能体模拟泊位在作业期间工作/空闲两个状态间循环切换的各个状态。泊位初始为未占用状态, 接收船舶到泊消息后处于被占用状态, 泊位智能体在船舶到达后, 对船舶的装卸任务进行登记备案, 并调用岸桥智能体和 AGV 智能体进行装卸船作业; 该泊位服务的船舶完成作业后, 泊位向该船舶发送离开消息, 之后泊位返回未占用状态, 等待下一艘船舶靠泊。

4) DTQC 智能体模拟自动化双小车岸桥的装卸过程。如图 2 所示, 本智能体内置两套状态流程图, 分别对岸桥装卸作业中主小车和副小车的状态和协同作业进行控制, 主小车和副小车以岸桥的中转平台作业结合点, 该中转平台设置两个 40 ft (12.2 m) 集装箱箱位, 主小车根据中转平台空闲情况进行装卸作业, 副小车则在岸桥下有服务车辆时根据中转平台的状态进行装卸作业。



a) 主小车状态流程

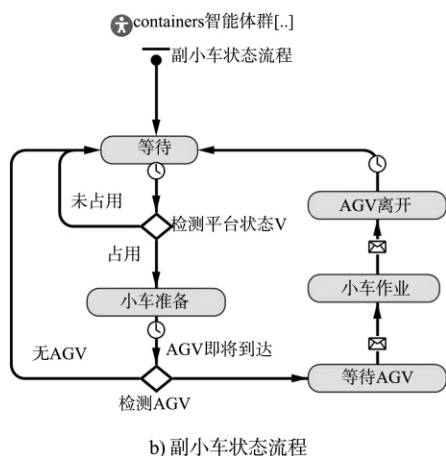


图2 DTQC 智能体状态流程及相关参变量

5) ARMG 智能体是自动化集装箱堆场的主要装卸设备,在箱区端部布置交接区并安装集装箱中转支架,AGV 到达堆场后,通过自带的升降平台对集装箱支架取、放箱,集装箱支架和箱区之间的集装箱存取由自动化轨道吊完成。如图3所示,ARMG 智能体包含两个状态流程图,分别表示 ARMG 和集装箱中转支架在装卸作业中的状态变迁以及相互间的交互。

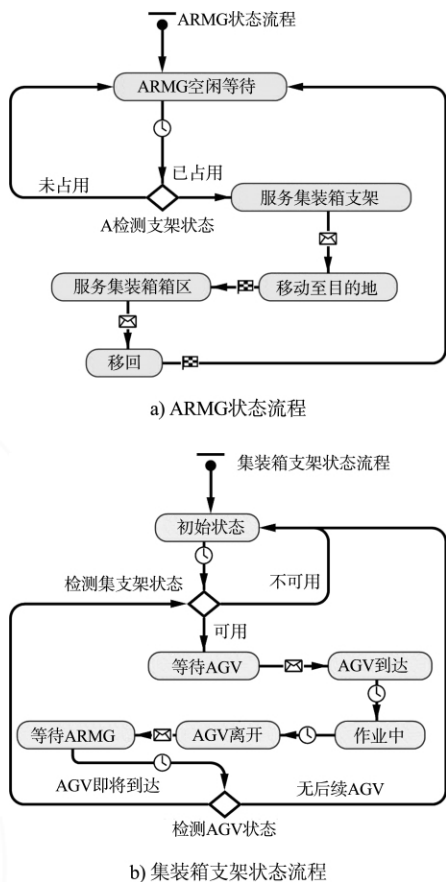


图3 ATMG 智能体状态流程

6) AGV 智能体基于仿真平台的道路交通库实现,在路网中实现车辆的排队、跟驰等特性,并根据目的地选择合适的行驶路线,作为连接堆场箱区和码头前沿的水平运输机械与其他智能体间存在大量交互和协同作业。

3 仿真试验及结果分析

以7万吨级泊位为例,该自动化集装箱港区为顺岸式布置,采用“双小车岸桥+自动导引车+自动化轨道吊”全自动化装卸工艺,每个泊位配备4台岸桥,岸桥与自动化轨道吊的机械配比为1:3,岸桥与AGV的机械配比为1:4。

首先,根据该港区顺岸式码头泊位数量,仿真试验共分为7组,即港区规模 $B_{th} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$; 在每组试验中又根据船舶日到港率形成30个船舶到港密度方案,共形成210个仿真试验,如表1所示;然后,利用本文建立的自动化集装箱码头装卸作业微观仿真模型,分别模拟每组试验下连续布置 n ($n = 1 \sim 7$) 个7万吨级集装箱泊位条件下的码头作业,得到不同船舶到港密度下的AWT/AST、泊位利用率、泊位平均通过能力;最后,根据仿真结果得出AWT/AST与泊位利用率和泊位平均通过能力之间的定量关系,进而分析自动化集装箱码头的合理通过能力。

表1 仿真试验方案

仿真方案组	港区规模 B_{th}	船舶日到港率/(艘·d ⁻¹)			方案数
		最小值	最大值	步长	
1	1	0.2	1.65	0.05	30
2	2	0.6	3.5	0.1	30
3	3	3.1	6.0	0.1	30
4	4	2.8	8.6	0.2	30
5	5	5.0	10.8	0.2	30
6	6	7.2	13.0	0.2	30
7	7	10.0	15.8	0.2	30

3.1 仿真参数

集装箱船舶到港时间间隔服从负指数分布;船舶辅助作业时间分别为:靠泊时间服从三角分布(0.5,1.0,2.0)h,开工准备时间服从三角分布(0.2,0.6,1.0)h,作业结束时间服从三角分布(0.2,0.6,1.0)h,离泊时间服从三角分布(0.5,0.75,1.0)h。

双小车岸桥主小车运行速度45 m/min,副小车

运行速度 240 m/min, 满载起升速度为 60 m/min; 自动化轨道吊大车的移动速度为 120 m/min, 小车运行速率为 90 m/min, 满载起升速度为 30 m/min。

AGV 的单次运输量为 2 TEU, 行驶速度为 6 m/s。

3.2 结果分析

仿真时间为 365 d, 分别仿真运行 210 个仿真试验方案, 每个方案仿真重复次数为 10 次, 部分仿真结果见表 2。

表 2 部分仿真方案对应的仿真结果

泊位数	船舶日到港率/艘	AWT/min	AST/min	泊位平均通过能力/TEU	泊位平均占用时间/min
1	0.2	2	523	40 171	11 149
	0.5	46	522	177 300	50 918
	0.8	103	523	395 798	114 324
	1.1	193	523	623 443	180 427
	1.4	326	522	834 922	241 684
2	0.6	3	522	121 266	34 892
	1.2	16	523	343 270	99 413
	1.8	47	523	568 599	164 787
	2.4	95	523	764 635	221 522
	3.0	185	523	982 116	284 720
3	3.1	31	523	666 595	193 347
	3.7	54	523	803 772	233 061
	4.3	85	523	934 289	270 849
	4.9	143	523	1 056 909	306 457
	5.5	251	523	1 209 960	350 882
4	2.8	4	523	464 544	134 723
	4.0	15	522	646 788	187 503
	5.2	39	522	853 931	247 555
	6.4	81	523	1 038 153	301 102
	7.6	212	523	1 248 120	362 073
5	5.0	10	523	647 029	187 601
	6.2	21	522	823 329	238 742
	7.4	42	522	968 948	280 958
	8.6	86	523	1 129 459	327 649
	9.8	191	523	1 277 138	370 540
6	7.2	11	523	782 791	226 979
	8.4	22	523	914 033	265 181
	9.6	43	522	1 043 585	302 637
	10.8	81	522	1 181 239	342 565
	12.0	172	523	1 311 666	380 476
7	10.0	18	523	931 836	270 320
	11.2	35	523	1 042 723	302 506
	12.4	62	523	1 172 780	340 235
	13.6	109	522	1 273 759	369 433
	14.8	221	522	1 386 862	402 242

对仿真结果进行数据处理, 得到不同的泊位平均通过能力与其对应的 AWT/AST 和泊位利用率之间的关系见图 4~5。

1) 如图 4 所示, 顺岸式码头泊位数 n 一定时, 泊位利用率和 AWT/AST 呈现指数形式的正相关, AWT/AST 随着泊位利用率的提升而迅速增加, 且增长率不断上升。另外, 相同泊位利用率下, AWT/AST 随着泊位数 n 的增加而迅速减少, 即港口服务水平不断提高, 在 $n \leq 5$ 时 AWT/AST 减幅最为明显, 之后缓慢增加基本保持平稳。

2) 如图 5 所示, 当顺岸式码头泊位数量 n 相同时, 随着 AWT/AST 的增加, 泊位平均通过能力首先大幅增加, 之后缓慢增加, 增长率逐渐减小。在相同的 AWT/AST 下, 泊位平均通过能力随着泊位数量 n 的增多而大幅增加, 当到达 5 个泊位之后增幅很小, 基本保持不变。因此, 仅从泊位通过能力增幅来看, 自动化集装箱码头连续布置 5 个泊位相对经济合理。

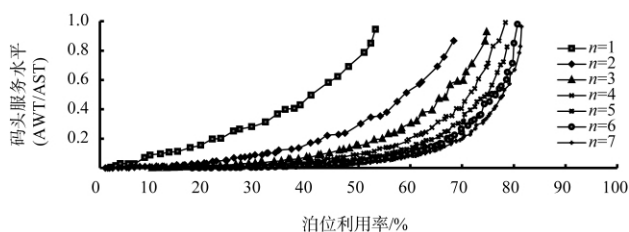


图 4 码头服务水平 (AWT/AST) 和泊位利用率关系

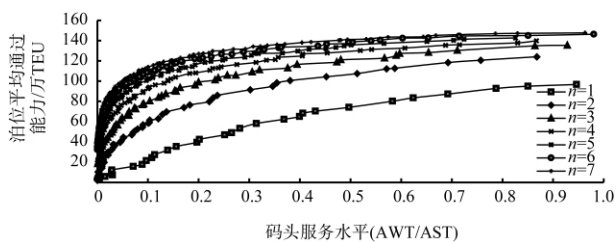


图 5 码头服务水平 (AWT/AST) 和泊位平均通过能力关系

3) 经曲线拟合, 得到顺岸式码头布置 n ($n=1 \sim 7$) 个泊位时 AWT/AST 和泊位通过能力的关系式 $y=A_n \ln x+B_n$, 如表 3 所示。其中 x 表示码头服务水平 (AWT/AST), y 表示泊位通过能力, 单位万 TEU/a。同时, 得到自动化集装箱码头处于不同服务水平 (AWT/AST) 时所对应的泊位通过能力, 见表 4。

表 3 码头服务水平(AWT/AST)和泊位通过能力
(万 TEU/a)拟合方程

n	泊位通过能力(万 TEU/a) 拟合方程	R ²
1	$y = 32.297\ln x + 95.342$	0.989 6
2	$y = 28.669\ln x + 125.9$	0.992 7
3	$y = 25.486\ln x + 138.75$	0.996 7
4	$y = 23.438\ln x + 146.47$	0.997 2
5	$y = 21.245\ln x + 150.42$	0.996 7
6	$y = 19.322\ln x + 152.54$	0.996 1
7	$y = 18.165\ln x + 154.95$	0.996 2

表 4 不同数量泊位连续布置下各码头服务水平对应的
泊位通过能力 万 TEU/a

顺岸式码头的泊位数 n	AWT/AST				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	21	43	56	66	73
2	60	80	91	100	106
3	80	98	108	115	121
4	93	109	118	125	130
5	102	116	125	131	136
6	108	121	129	135	139
7	113	126	133	138	142

4 结论

1) 当顺岸式集装箱自动化码头布置相同数量的泊位时,泊位通过能力随码头服务水平指标(AST/AWT)的增加而增大,成对数函数关系。

2) 在一定码头服务水平下,泊位通过能力和顺岸式码头的泊位数量成对数函数关系,增加泊位数可以使泊位通过能力得到显著提高。从泊位通过能力增幅来看,自动化集装箱码头连续布置 5 个泊位相对经济合理。

3) 提出顺岸式自动化集装箱码头合理通过能力计算公式 $y = A_n \ln x + B_n$, 并确定了顺岸式码头布置 n 个泊位时对应的系数值 A_n 、 B_n , 可有效确定自动化集装箱码头的合理通过能力。

4) 采用基于多智能体仿真的自动化集装箱码头微观仿真模型,可有效地定量评价码头生产作业系统的性能,可为自动化集装箱码头的规划与运营提供决策支持。

参考文献:

- [1] 吴沙坪,何继红,罗勋杰.洋山四期自动化集装箱码头装卸工艺设计[J].水运工程,2016(9):159-162+166.
- [2] 刘剑,王诺,陈俊虎,等.关于集装箱码头年泊位通过能力核定的几个问题[J].水运工程,2008(4):42-45.
- [3] LIU C I, JULA H, IOANNOU P A. Design, simulation, and evaluation of automated container terminals [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2002, 3(1): 12-26.
- [4] WANG W, SONG X, TANG C, et al. System simulation of capacity for container terminal based on Stochastic Petri Net[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics. US: IEEE, 2008: 2889-2892.
- [5] LEE B K, LEE L H, CHEW E P. Analysis on container port capacity: a Markovian modeling approach [J]. Or spectrum, 2014, 36(2): 425-454.
- [6] DEMIRCI E. Simulation modelling and analysis of a port investment [J]. Simulation transactions of the society for modeling & simulation international, 2003, 79(2): 94-105.
- [7] TANG G, GUO Z, YU X, et al. SPAC to improve port performance for seaports with very long one-way entrance channels [J]. Journal of waterway port coastal & ocean engineering, 2014, 140(4): 04014011.
- [8] AZAB A, ELTAWIL A. A simulation based study of the effect of truck arrival patterns on truck turn time in container terminals [C]//European conference on modelling and simulation. Regensburg, Germany: [s.n.], 2016.
- [9] WANG Z M, HE X M. On the reasonable throughput capacity of container terminals [J]. Port & waterway engineering, 2004(3): 16-20.
- [10] WU Y, PENG C. An analysis of capacity and service level of the container terminals of Hong Kong [C]//International Conference on Service Systems and Service Management. US: IEEE, 2013: 404-409.
- [11] DING Y. Throughput capacity of a container terminal considering the combination patterns of the types of arriving vessels [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2010, 15(1): 124-128.

(下转第 188 页)



(本文编辑 郭雪珍)

(本文编辑 武亚庆)