

## 基于 Flexsim CT 的集装箱码头集卡作业模式比较仿真研究

孙洪运<sup>1</sup>, 郭姝娟<sup>2</sup>, 郑彭军<sup>1\*</sup>

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 基于5项影响集装箱码头运作水平的重要评价指标进行了Flexsim CT软件仿真模拟, 分析和比较了2种码头集卡作业模式的优劣。仿真数据显示, 船舶交互次数会对某些指标产生重要影响。当交互次数相同时, 作业面模式的各项指标更优; 随着交互次数的增加, 集卡总行走距离这项指标的优势更明显。定量分析和定性研究均表明, 集卡的作业面模式整体效率更高、成本更低。

**关键词:** 集装箱码头; 集卡动态调度; 作业线; 作业面; Flexsim CT

**中图分类号:** U693+.33

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2019) 01-0104-05

不论是集装箱入堆场、堆场布局、转运还是码头前沿运输, 集卡都是码头承载业务量最大、灵活性最强、作业流程最复杂的设备之一, 集卡作业效率严重影响码头生产效率。

Kozan<sup>[1]</sup>利用网络数学模型对集装箱转运进行优化; Etsuko 等<sup>[2]</sup>认为启发式“动态路径”拖车分配方法可用于解决多于一个集装箱的拖车能力; Carlo 等<sup>[3]</sup>发现集装箱码头综合决策有利于更好地调整作业流程; 尚晶等<sup>[4]</sup>认为堆场与前沿通过栈桥连接的集装箱码头更有必要采用集卡实时调度模式, 且动态优化组合调度是有效的<sup>[5]</sup>; 基于此, 俞涛<sup>[6]</sup>建立了集卡路径优化数学模型。由于集卡配置量应该是动态的<sup>[7]</sup>, 陆永祥<sup>[8]</sup>优化并整合集卡运输路径选择和集卡配置数量, 何赞燕<sup>[9]</sup>也给出集卡合理配置量建议。基于集卡作业面多路排队的合理性和可行性<sup>[10]</sup>, 杨静蕾<sup>[11]</sup>认为集卡平面作业模式更具有实现集卡动态调度等优势, 在完成相同作业下, 多路排队作业的集卡等待时间比单路排队短<sup>[12]</sup>, 集卡平面作业模式比“作业线”作业模式时间节省15%<sup>[13]</sup>、减少近31%的集卡行驶距离<sup>[14]</sup>。

本文从“作业面”和“作业线”两方面对集装箱码头集卡作业进行定性分析, 然后利用 Flexsim CT 软件建模。模型从船舶交互作业出发, 综合考虑集卡、岸吊、堆场、龙门吊等码头元素组成的作

业面整体效率, 设置相关参数, 给出评价标准, 通过仿真效果及数据结果, 来验证集卡“作业面”作业模式比传统“作业线”作业模式更优, 并对码头运营管理提供一定的决策支持。

## 1 两种集装箱码头集卡作业模式

根据集卡作业路径, 可将集装箱码头集卡作业模式划分为“集卡作业线作业模式”和“集卡作业面作业模式”。

集卡作业线作业模式下, 每台岸吊按照一定比例配备集卡数量, 一般每台岸吊配备5~6辆集卡, 这些集卡组成1个集卡组。1台岸吊、固定比例的劳动力和对应配备的集卡组成了1条作业线, 直到岸吊装卸作业完成为止, 全过程由调度人员安排。集卡组的行车路线相对固定, 在集卡作业循环过程中, 半圈为重载, 半圈为空载, 不连续完成装船和卸船运输, 整个作业线固定且集卡“单向作业”。1个码头经常有多条作业线同时作业, 在岸吊装卸过程中, 多个集卡组多队列排队等候作业。

集装箱码头集卡作业面作业模式又称为“集卡单路排队作业模式”。从整个集装箱码头来看, 正在进行船舶在港作业的多艘船或多个舱口、多台岸吊、多个进出口堆场或箱区、一定的劳动力及所有集卡形成一个作业面。在该模式下, 1个泊位可以

收稿日期: 2017-09-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51408323); 欧盟地平线2020计划项目(690713); 浙江省自然科学基金(LY15E080013)。

第一作者: 孙洪运(1993-), 女, 四川达州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 城市物流配送. E-mail: 739332081@qq.com

\*通信作者: 郑彭军(1965-), 男, 浙江宁波人, 研究员, 主要研究方向: 交通信息与控制系统. E-mail: zhengpengjun@nbu.edu.cn

由多台岸桥同时作业,多台岸吊能够共享所有集卡,每台岸桥不再专享固定比例的劳动力和集卡,集卡能同时参与多条作业线,资源分配更合理,大大降低了成本。所有集装箱调度由统一的中央控制中心统一管理,集卡、桥吊指挥员、到港船舶、机械设备等各环节配备可与控制中心互相沟通的无线终端。中央控制中心接收船舶装卸货信息,结合堆场、集卡、装卸作业等情况,利用动态调度系统,得出桥吊、集卡调度等信号,并传递给桥吊指挥员、船舶,当岸吊到位后,再将集卡调度信号传递给桥吊指挥员和等待作业的集卡。在装卸船作业过程中,船舶、集卡、岸吊及中央控制中心在内的多方可共享信息、实时交流和反馈信息,使得集卡行走路径实现动态最优,应急预案能力更强。集装箱码头动态调度坚持三项原则,且重要性次第降低。

(1)首先考虑岸吊效率,哪台岸吊下比较空闲或等待的集卡较少,则优先调配到该岸吊。因为岸吊是船舶装卸货作业中成本极高的设备,只有岸吊高效运作才能充分实现其价值,降低单位成本。

(2)给离码头前沿较近的和堆场附近空闲的集卡优先下达任务指令,这样可尽可能减少集卡行走距离。

(3)当几条作业线上等待作业的集卡数量相当时,为空闲集卡下达路径最短的运输作业指令<sup>[4]</sup>。

实际操作中,小型集装箱船一般只开1个进口卸船舱口和1个出口装船舱口,大型集装箱船常常会出现2个或多个舱口同时作业。装卸船作业过程中,码头工作人员安排1台岸吊为某个进口或出口舱口服务。图1和图2中, $X$ 代表某艘到港集装箱船的某进口舱口, $Y$ 代表该艘船或另1艘船的某出口舱口。1个码头往往会有多个进口堆场或箱区(用 $X_i$ 表示)和出口堆场或箱区(用 $Y_j$ 表示),因此,集卡在进行装卸船运输时,指挥中心或控制中心会根据堆场的实际堆存情况安排集卡到某个堆场或箱区的某个堆位作业。与集卡“作业线”作业模式的集卡“单向作业”(即“重进轻出”或“轻进重出”堆场)相比,集卡“作业面”作业模式的整个装卸船作业在“动态调度”原则下,集卡组会动态分配集卡给需要的岸吊,单辆集卡可以在1条作业回路上同时服务2台岸吊,实现了集卡“重进重出”堆场

循环作业和“多向服务”2台龙门吊和2台岸吊。实践中,集卡作业面作业模式往往需要有作业线作业模式配合。

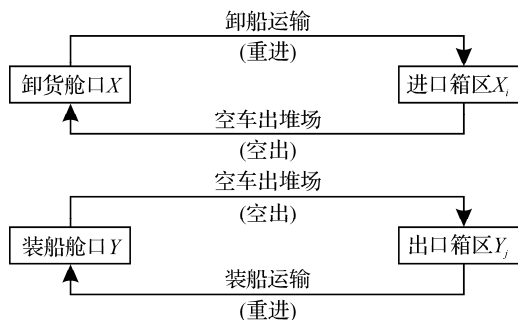


图1 集卡进出口“作业线”作业模式示意图

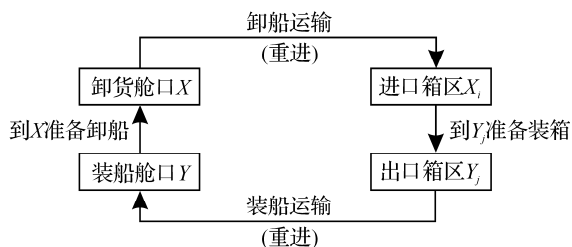


图2 集卡进出口“作业面”作业模式示意图

除实际操作方面的差别,作业线模式信息交换程度低,而作业面模式能多方实时通信,所以信息更通畅;作业线管理模式很传统,动态调度系统统筹管理使得作业面模式更先进。

从信息畅通性、管理模式、集卡及考核等多方面做详尽对比也能发现这2种模式之间的差异。

## 2 Flexsim CT 实验仿真

### 2.1 Flexsim CT 仿真软件

Flexsim CT 仿真软件是由美国 Flexsim Software Production 公司开发的专为集装箱码头仿真设计的 Flexsim 模型库,是采用最新 VR 技术的商业化离散事件系统,能自动实现动态调度。利用 Flexsim CT 仿真建模,可以分析集装箱堆场的堆存策略、船期计划、场区设备配置、泊位安排、堆场布局和调配等。结合模型运行后收集到的数据与实际情况,对模型参数或布局作调整,可以改进集装箱码头运作过程中存在的问题。

### 2.2 仿真实验

本模型在布局过程中选择2种模式所必须的资源,包括岸吊、龙门吊、集装箱、集卡组、泊位、堆场和船舶等。在保证岸吊效率的前提下,通过改

变整体布局和相关参数,完成集卡2种作业模式基本建模。本次仿真模拟设定4组模型,每组包括1个集卡作业线仿真和1个集卡作业面仿真,每个仿真模型模拟6艘船舶装卸作业,交互次数分别为0、1、3、5。这里的交互是指会出现1艘船装船、另1艘船卸船同时进行的“集卡作业面作业现象”。具体设置如下:模型一中每艘船均是单独作业,互不干扰;模型二的前2艘船会出现同时在港作业的情况(即“作业交互”),另外4艘均是艘单独作业;模型三将6艘船分为3组,每组的2艘船舶有交互作业,但是各组互不交互;模型四的6艘船相邻2艘相互交互(图3)。所有实验运行时间、运行速度均相同,拟将运行时间划分为6个时期。

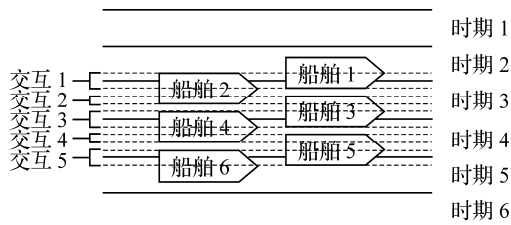


图3 模型四(所有船舶两两交互)

仿真建模主要涉及的码头资源包括岸吊、龙门吊、泊位、集卡。故选择了岸吊平均工作效率、泊位生产能力、集卡平均闲置率和集卡总行走距离这5项评价指标作为评定标准。模型基础参数设定如下:

- (1)设置进口箱(IMPO)和出口箱(EXPO)2种类型的集装箱,FEU 集装箱尺寸;
- (2)设置1000 m 长的泊位,并配置2台岸吊;
- (3)每艘船设置1个进口舱和1个出口舱,1周内总的卸箱量是800个,装箱量是1200个;
- (4)设置4个堆场,其中2个堆场属于进口箱区,另2个属于出口箱区,并为每个堆场配置1台龙门吊;
- (5)设置2种堆存策略——Default Strategy 和 Strategy。Strategy 策略可以实现堆位的加权搜索;
- (6)设定50倍运行速度,总运行时间设为10000 min,保证6艘船完成1轮装卸作业。

所有模型都要完成上述参数设置。此外,为所有集卡作业线作业模型配置2个集卡组,每组6辆集卡,为每个集卡作业面作业模型配置12辆集卡的集卡组。作业面模式下集卡的“重进重出”路径

如图4所示。

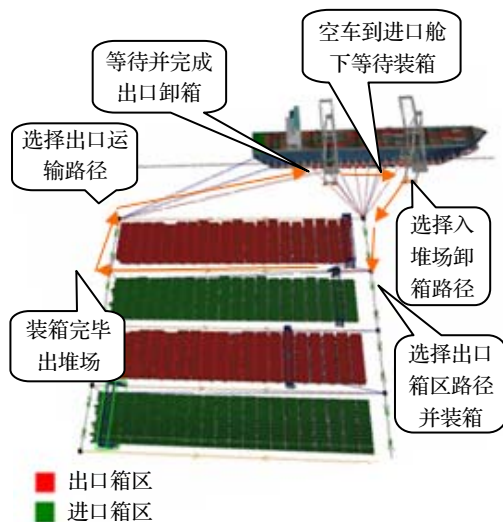


图4 作业面模式下集卡“重进重出”3D路径

在集装箱码头堆场运输过程中,只有第1艘船在港作业时,系统自动为每个舱口配置1台岸吊;当2艘船同时在港作业,每艘船自动获得1台岸吊。作业线模式下每台岸吊由1个集卡组固定为其服务,作业面模式下12辆集卡共同为2台岸吊服务,当哪台岸吊下面的排队等待的集卡较少时,系统自动为其安排1台空闲的集卡,且所有集卡在保证路面畅通的情况下,会由系统自带的调度中心动态选择一条相对最优路径。2种模式下的集卡进出堆场作业时,会根据堆场情况动态选择进口箱区或出口箱区的某个堆场。对堆存策略的设置使得集装箱在堆场存放过程会自动完成转堆和翻箱。

### 2.3 实验数据及分析

将所有数据归纳总结到表1,且表中分别用交互次数代表上述的4组模型。

从表1的仿真模拟数据结果可以看出,岸吊平均工作效率在71%左右小幅度波动,随着交互次数的改变,该指标数据发生变化,说明船舶交互次数对岸吊工作效率有影响。4组模型结果都显示出集卡作业面作业模式比作业线作业模式的岸吊工作效率高;船舶1、3、5次交互的差值有轻微上升趋势,说明一旦船舶有交互作业,随着交互次数增加,岸吊工作效率这项指标的优势更明显。

集卡作业面作业模式下的龙门吊运作效率在41%左右,始终比作业线作业模式的值高,所以其龙门吊的利用率更高。此外,不管如何改变船舶交

表1 2种集卡作业模式下各项指标

评价指标	集卡作业模式	交互次数			
		0	1	3	5
岸吊平均工作效率/%	作业线	71.65	71.20	71.10	70.65
	作业面	72.95	71.50	71.60	71.35
	差值	1.30	0.30	0.50	0.70
龙门吊实际运行效率/%	作业线	40.83	39.83	40.3	39.45
	作业面	41.65	40.98	41.25	41.68
	差值	0.82	1.15	0.95	2.23
泊位生产能力/%	作业线	42.30	53.20	57.10	50.90
	作业面	42.70	53.40	57.40	52.30
	差值	0.40	0.20	0.30	1.40
集卡平均闲置率/%	作业线	29.43	29.87	29.97	30.57
	作业面	21.75	16.84	19.38	26.68
	差值	7.68	13.03	10.59	3.89
集卡总行走距离/m	作业线	2 993 476	3 010 830	3 023 906.97	2 989 309.4
	作业面	2 721 992	2 673 536	2 649 488.81	2 473 259.1
	差值	271 484	337 294	374 418.16	516 050.3

互次数,各模型组中集卡作业面作业模式的泊位生产能力均高于作业线作业模式,这种优势程度与交互次数没有关系。

同时还表明,集卡作业面作业模式的平均闲置率始终低于传统模型,随着交互次数的增加,差值变小,由于2个模型的作业任务是一样的,这也说明在同等条件下完成同样运输量时,集卡作业面作业模式集卡利用率更高,需要的集卡数可以少于后者。要想降低集卡成本,可以考虑实行此种现代化模式。

集卡作业线作业模式的集卡总行走距离基本不变,然而作业面模式却呈明显的下降趋势。这说明船舶交互次数对集卡作业线作业模式的集卡行走距离没多大影响,但对作业面作业模式有积极意义。此外,随着船舶交互次数的增加,2种集卡作业模式的集卡总行走距离差距越来越大,证明船舶交互次数越多,集卡作业面作业模式下的集卡在途时间越短,且省距比例越大,优势也更明显。因此,在满足各项设施运作效能范围,将船期计划安排得更紧密有利于提高集卡作业面作业模式中的集卡利用率。

仿真过程中,因为堆场堆存策略的限制,使得作业面作业模型的某个堆场繁忙,而另一个堆场

空闲,进而出现到达堆场的集卡产生排队等待的现象,因而2台岸吊下的等待作业的集卡数不平衡,造成1台岸吊下面集卡排长队,另1台岸吊下面没有集卡。虽然系统会动态调度一部分集卡到空闲的岸吊下服务,但此部分集卡只能“半程空载、半程重载”,但仍不能完全满足岸吊的需求,这就导致集卡作业面作业模式中的岸吊平均工作效率和龙门吊实际运行效率与作业线模式相差不大,这还影响到了船舶在港作业时间,所以二者的泊位生产能力也相差不大。

### 3 结语

从各项相关指标皆可证明集卡“作业面”作业模式具有可行性,且比“作业线”作业模式的整体工作效率更高,更节约成本。在各项基础设施安全系数范围内,船舶交互次数越多,所研究的各项指标的优势更明显。在仿真模拟中也发现了一些问题,比如所有模型运行速度需恒定,否则会出现较大误差;有时进口箱区或出口箱区的2个堆场一个分身乏术、一个闲置,所以,如何进一步改善堆存策略需要更深入研究。另外,不同集装箱码头规模、布局 and 不同船期计划下的最优船舶交互次数不同;与传统集卡作业线作业模式可能会有很大冲

突,从长远来看,大港口很有必要做出改变,但是小型港口可能会因为成本等问题拒绝做出调整;该模式的实践、认可度的提升需要多方共同努力,也需要耗费大量的时间成本及资金成本。

#### 参考文献:

- [1] Kozan E. Optimising container transfers at multimodal terminals[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2000, 31(10/12):235-243.
- [2] Etsuko N, Imai A, Papadimitriou S. Yard trailer routing at a maritime container terminal[J]. Transportation Research Part E, 2005, 41(1):53-76.
- [3] Carlo H J, Iris F A, V, Roodbergen K J. Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(1): 1-13.
- [4] 尚品, 陶德馨. 集装箱码头集卡调度策略的仿真研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(5):827-830.
- [5] 严政, 陶德馨. 基于动态优化组合的集装箱码头集卡调度技术[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2006, 28(4):26-29.
- [6] 俞涛. 集装箱码头集卡作业组织优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [7] 高纬, 周强. 集装箱码头集卡作业模式比较及其建模与仿真[J]. 港口装卸, 2003(2):27-29.
- [8] 陆永祥. 实时作业调度下集卡优化配置数量的确定[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [9] 何赟燕. 面向同步装卸的集装箱码头集成调度方法[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [10] 王军, 陆永祥, 王美蓉, 等. 基于“作业面”模式下集卡配置的仿真研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(1):69-72.
- [11] 杨静蕾. 集装箱码头物流路径优化研究[J]. 水运工程, 2006(1):32-35.
- [12] 康志敏, 吴洪明. 港口集装箱码头集卡优化调度研究[J]. 物流工程与管理, 2011, 33(2):59-61.
- [13] 王军, 许晓雷. 集装箱码头集卡作业的路径选择[J]. 2011, 37(2):25-27; 34.
- [14] 魏宏磊, 朱瑾. 基于“作业面”优先策略的集装箱港口集卡路径优化研究[J]. 中国水运, 2012, 12(1):70-72.

## Comparison simulation of container terminal truck operation modes based on Flexsim CT

SUN Hong-yun<sup>1</sup>, GUO Shu-juan<sup>2</sup>, ZHENG Peng-jun<sup>1\*</sup>

( 1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China )

**Abstract:** Based on five important evaluation indexes, we build simulation models using the software-Flexsim CT to analyze and compare two operation modes of container terminal trucks, including operating line operation mode and working plane operation mode. Data analysis reveals that some indexes are affected by the number of the container ships' interactions. It is found that each index of working plane operation mode is improved with the same number of interactions. And with the number increasing, the trip in distance presents more obvious advantages than operating line mode does. Quantitative analysis and qualitative study both indicate that working plane operation mode achieves higher overall efficiency and lower cost.

**Key words:** container terminal; truck dynamic scheduling; operating line; working plane; Flexsim CT

( 责任编辑 章践立 )