

# 集装箱码头可变闸口设置及变更条件仿真

王文渊<sup>1</sup>, 郑天奇<sup>1</sup>, 程伟<sup>2</sup>, 周勇<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 为缓解集装箱码头闸口通道处的排队拥堵现象, 在闸口通道数一定的前提下, 根据进、出闸口通道处集卡排队不均衡程度, 基于可变闸口的方向可变更性, 提出一种动态调整进、出闸口通道数的工作方式. 以进、出闸口处集卡排队不均衡因数作为可变闸口的设置及变更条件, 通过构建闸口作业系统仿真模型, 模拟可变闸口对闸口服务水平的影响, 从而确定港区需要设置可变闸口和变更可变闸口工作方向的因数临界值. 研究表明, 设置可变闸口可以显著地缓解集装箱码头闸口通道处的排队拥堵现象.

**关键词:** 集装箱码头; 可变闸口; 服务水平; 系统仿真

**中图分类号:** U656.135; U169.6

**文献标志码:** A

## Simulation on setting and changing conditions of variable gates in container terminals

WANG Wenyuan<sup>1</sup>, ZHENG Tianqi<sup>1</sup>, CHENG Wei<sup>2</sup>, ZHOU Yong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;  
2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In order to alleviate the queuing congestion before container terminal gates, an operation mode is proposed to adjust the numbers of inbound and outbound gates dynamically according to the unbalanced degree of container truck queuing before all gates, where the total number of gates is constant and some gates are variable gates (that is, a variable gate can change its direction to become an inbound gate or an outbound gate). The queuing imbalance coefficient before inbound and outbound gates is used as the setting and changing condition of variable gates. The simulation model of the gate operating system is built in order to simulate the effect of variable gates on the service level of gates, and then find out the coefficient critical values of setting variable gates and changing their direction of variable gates. The result shows that setting variable gates can significantly alleviate the queuing congestion before container terminal gates.

**Key words:** container terminal; variable gate; service level; system simulation

收稿日期: 2016-11-02 修回日期: 2017-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(51309049, 51279026)

作者简介: 王文渊(1984—), 女, 辽宁阜新人, 副教授, 博士, 研究方向为港口平面布置、航道规划仿真及优化等, (E-mail) wangwenyuan@dlut.edu.cn

## 0 引言

集装箱码头大门是公路集装箱进出港区的必经之地,随着集装箱集疏运量的增加,码头大门逐渐成为集装箱港区车辆最集中、交通最拥挤的地方.然而多数港区由于空间或者经济条件有限无法扩增闸口通道总数,导致其通过能力无法适应日益增长的物流需求.因此,充分利用现有闸口通道,提高码头大门通过能力,对提高集装箱港区作业效率有着十分重要的意义.

近年来,有关集装箱码头大门通过能力及规划的研究逐渐受到重视.国外的一些学者已经取得了一定的研究进展. MINH 等<sup>[1]</sup>研究开发了一种规划工具研究集装箱码头大门布局. GUAN 等<sup>[2]</sup>建立了一个多服务台模型分析集装箱码头大门拥堵情况和集卡等待成本. BOILE 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于仿真的方法,用于评估排队拥堵现象对集装箱码头作业效率的影响. LAI 等<sup>[4]</sup>利用系统仿真技术,建立了集装箱码头大门作业系统仿真模型. CHEN 等<sup>[5]</sup>建立了一个基于模拟的回归模型,并利用微观交通仿真软件开发了集装箱码头大门闸口通道处集卡排队长度的估计模型. ZENG 等<sup>[6]</sup>建立了一个数学模型,用于估算铁路集装箱码头闸口通道数. 国内的学者对集装箱码头大门通道数的研究也做了很多工作. 麦宇雄等<sup>[7]</sup>提出了基于随机服务系统的集装箱码头大门最佳车道数及停车缓冲区长度的计算方法. 张莎莎等<sup>[8]</sup>建立了季节性神经网络预判模型,对码头闸口的交通量进行了预测. 付强等<sup>[9]</sup>结合集装箱码头物流作业系统的工作特点,利用系统仿真技术建立了集装箱码头物流系统仿真模型. 刘翠莲等<sup>[10]</sup>建立了数学模型研究集装箱码头大门最优规模. 于越等<sup>[11]</sup>以闸口建设费用最小化为规划目标,建立了基于仿真的优化模型,得到了集装箱码头大门最优规模. 许晓雷<sup>[12]</sup>通过建立数学模型进行了集装箱码头闸口数的优化研究. 杨瑞娜等<sup>[13]</sup>利用排队理论和仿真技术,建立了铁路集装箱大门仿真模型,从而确定最佳的大门通道数. 然而,上述研究都以规划集装箱码头大门布局或优化集装箱码头大门规模为目标,未考虑在集装箱码头大门布局和规模已经确定的情况下,如何提高闸口通道的通过能力.

本文借助 Arena 仿真软件,引入可变闸口及集卡到港排队不均衡因数等概念,对集卡到港不均衡状态下港区大门的服务状态进行仿真,研究通过设置可变闸口提高闸口通过能力的可行性,以及可变闸口变更作业方向的控制条件.

## 1 相关概念

### 1.1 可变闸口

集卡到离港是一个三级排队系统,如图1所示. 集卡到离港具有随机性,同时,由于进、出闸口处的服务业务不同,导致集卡在进、出闸口通道处接受服务的时间存在一定的差异,从而出现某一方向的闸口交通压力过大,而另一方向的闸口通过能力还有很大冗余的情况.

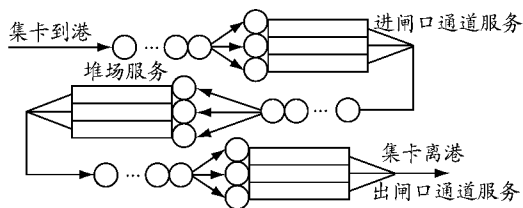


图1 集卡排队系统示意图

为在保持闸口通道总数不变的情况下,缓解集装箱码头大门进、出闸口通道处集卡排队不均衡现象,提高闸口服务效率,参考道路交通的潮汐车道<sup>[14-15]</sup>的思想,提出根据进、出闸口的交通流的动态需求,实时变化某些闸口集卡通行方向,最大限度地提高闸口的通过能力.

### 1.2 闸口变更通行方向依据

可变闸口是否需要变更通行方向的判断依据是进、出闸口通道处集卡的排队拥堵情况. 为定量描述进、出闸口处集卡的排队拥堵程度,定义排队不均衡因数为  $\tau = \frac{\text{进闸口处集卡平均排队长度}}{\text{出闸口处集卡平均排队长度}}$ .

为实现可变闸口在工作中能够根据需求变更通行方向,需要确定  $\tau$  的临界值  $\tau^*$ . 以可变闸口的初始通行方向为进闸口为例,可变闸口变更通行方向的依据为: 当  $\tau > \tau^*$  时,可变闸口继续作为进闸口使用,直到进闸口处的拥堵现象得到缓解,  $\tau$  逐渐下降; 当  $\tau < 1/\tau^*$  时,可变闸口调整为出闸口使用; 当  $\tau \in [1/\tau^*, \tau^*]$  时,可变闸口保持当前通行方向不变.

如果  $\tau^*$  过小,可变闸口变更通行方向将变得频繁; 如果  $\tau^*$  过大,可变闸口工作的敏感性将显著降低,无法充分体现可变闸口的作用. 因此,需要找到一个合理的  $\tau^*$ .

## 2 仿真模型

### 2.1 集装箱码头大门的作业流程

未设置可变闸口的集装箱码头大门系统的作业流程为: ①集卡到达港区,若进闸口通道空闲,则接

受服务,否则排队等待;②集卡行驶至堆场进行装卸;③集卡行驶至出闸口处,若出闸口通道空闲,则接受出闸口通道服务,离开港区,否则排队等待直至有通道空闲。

无论是否设置可变闸口,集装箱码头大门系统作业流程是相似的,只是在进、出闸口通道选择环节,需要根据可变闸口当前的通行方向,选择合适的闸口通道。设置可变闸口的集装箱码头陆域布置见图2。

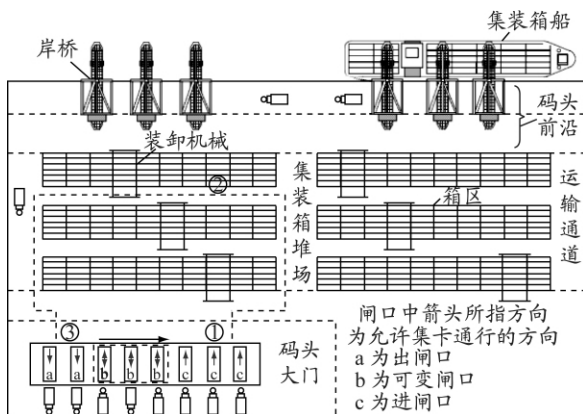


图2 设置可变闸口的集装箱码头陆域布置

## 2.2 设置可变闸口的集装箱码头大门作业系统仿真模型

为研究设置可变闸口对提高集装箱码头大门作业系统通过能力的效果,找到变更可变闸口通行方向的合理临界值,建立仿真模型。该仿真模型主要包括集卡实体生成、可变闸口通行方向判定、进闸口通道选择、堆场作业和出闸口通道选择等5个子模型,具体如下:

集卡实体生成子模型。利用 Create 模块产生集卡实体,从集卡到港的数据文件中读取到港间隔并赋值,之后集卡实体进入 Read Arrival Time 模块,再经 Read Delay Time 模块读取数据,到达 Delay Until Actual Call Time,这样保证每一辆集卡与其时间参数一一对应。Separate into Duplicate Entity for Call Arrival 模块一方面能够将集卡实体通过 Original 退出点传送回 Read Arrival Time 模块,再从数据文件中获取下一个集卡到港的时间间隔,另一方面能够产生一个集卡副本,通过 Duplicate 退出点将其传送到模型中,完成所有剩余的模型逻辑。

可变闸口通行方向判定子模型。集卡实体首先经 Decide 模块判断可变闸口当前通行方向,然后通过  $\tau$  与  $\tau^*$  或  $\tau$  与  $1/\tau^*$  大小比较模块比较大小,再经 Assign 模块赋值,从而判定可变闸口的通行方向。

进闸口通道选择子模型。集卡准备通过进闸口通道进入港区作业,通过 Submodel 子模型选择最合适闸口通道。采用 Nonpooled 排队系统,通过 Decide 模块判断各进闸口通道是否空闲:如果有空闲的进闸口通道,则集卡选择该闸口通道接受服务;如果没有空闲的进闸口通道,则集卡选择排队长度最小的闸口通道排队等待。之后,集卡通过进闸口通道进入港区,准备进入堆场接受服务。

堆场作业子模型。集卡进入集装箱码头堆场,通过 Decide 模块判断装卸机械是否空闲;接着集卡在堆场进行装卸作业;之后集卡离开堆场,准备进入出闸口通道。

出闸口通道选择子模型。其主要流程与集卡进闸口通道选择模块相同。

## 3 算例

选取中国北方某重要的集装箱枢纽港进行算例研究。该港口拥有14个集装箱泊位,可停靠第5和第6代集装箱船舶,设计年通过能力达910万TEU,年均到港集卡数量约为456000辆。

### 3.1 仿真参数

集卡到港时间。以通过实际调研得到的集卡到港数据作为原始数据,统计结果见图3。该港区集卡到港没有明显的规律性,因此选取该港区1年的集卡到港时间数据进行研究。

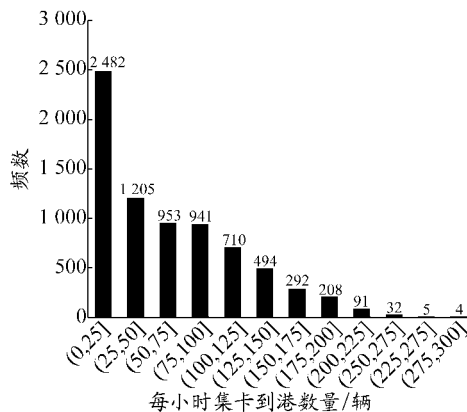


图3 集卡到港数量分布直方图

堆场作业时间。根据 K-S 检验,集卡在堆场内的作业时间服从正态分布,均值为 17.8 min,标准差为 0.163 min。

闸口服务时间。根据 K-S 检验,进、出闸口的服务时间均服从正态分布,其中:进闸口平均服务时间为 0.971 min,标准差为 0.320 min;出闸口平均服务时间为 0.796 min,标准差为 0.340 min。

闸口数量。根据该港区实际情况,共布置8个闸

口通道。

### 3.2 $\tau^*$ 的确定

为得到可变闸口变更通行方向的判断条件,需要找到  $\tau^*$  ( $\tau^* > 1$ ),使得闸口的各项排队指标最优。设置 1 个可变闸口且  $\tau^* \in [1.1, 2.3]$  时仿真集装箱码头大门的作业状态。各仿真方案重复运行 20 次,取 20 次仿真结果的平均值作为最终结果。不同仿真工况下码头大门集卡最长排队时间、平均排队时间、最长排队长度和平均排队长度统计结果见图 4。

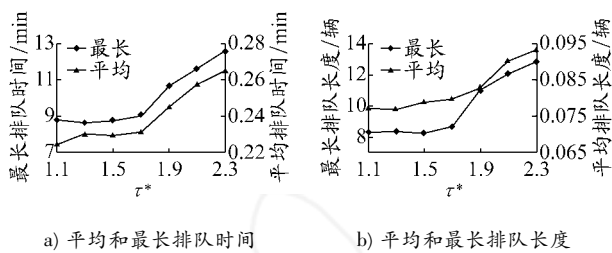


图 4  $\tau^*$  不同时集卡各排队指标的变化

由图 4 可知:随着  $\tau^*$  的增大,集卡在闸口通道前的各项排队指标的变化趋势是一致的;在  $\tau^* < 1.7$  时,  $\tau^*$  对排队指标影响不大,说明当  $\tau^* \in [1/1.7, 1.7]$  时,在最大排队指标变化不大的前提下,  $\tau^*$  应该尽量取大值,这样可变闸口通行方向的变更不至于太频繁;当  $\tau^* > 1.7$  时各项排队指标随  $\tau^*$  的增加迅速增加,显然当  $\tau^*$  足够大时,模型中可变闸口改变通行方向的临界值将永远无法达到,可变闸口将不再变更通行方向。因此,本例中  $\tau^*$  的合理临界值应取为 1.7,即当  $\tau < 1/1.7$  或  $\tau > 1.7$  时,应考虑设置可变闸口。此时可变闸口由进闸口变为出闸口的判断条件为  $\tau < 1/1.7$ ,而由出闸口再次变为进闸口的判断条件是  $\tau > 1.7$ ,当  $\tau$  在  $[1/1.7, 1.7]$  内时,可变闸口维持当前通行方向不变。

### 3.3 设置可变闸口对提高码头大门通过能力的效果

为研究设置可变闸口对提高码头大门通过能力

表 1 方案 C 与方案 A 和 B 的显著性差异检验统计(97.5% 置信区间)

方案对	最长排队 长度差值/辆	最长排队 时间差值/min	平均排队 长度差值/辆	平均排队 时间差值/min
C 与 A	-8.24, -6.98	-8.67, -8.37	-0.115, -0.095	-0.325, -0.285
C 与 B	-4.38, -3.36	-3.61, -2.69	-0.088, -0.072	-0.136, -0.094

分析统计结果,得到如下结论:

1) 从图 5 中各方案进、出闸口处集卡各项排队指标的均衡程度可以看出:方案 A 和 B 表现出显著的不均衡性,其中方案 A 中进闸口处集卡各项排队

的效果,对不设置可变闸口时 4 进 4 出的闸口组合方案(方案 A)、5 进 3 出的闸口组合方案(方案 B)以及设置可变闸口的方案(方案 C)进行仿真研究。各仿真方案重复运行 20 次,取 20 次仿真结果的平均值作为最终结果。不同仿真工况下码头大门集卡最长排队时间、最长排队长度、平均排队时间和平均排队长度统计结果见图 5。

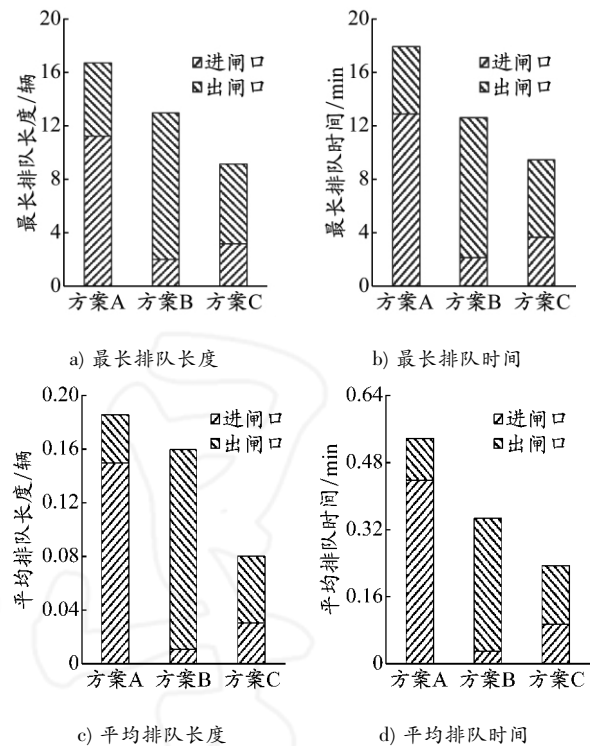


图 5 不同仿真工况下集装箱码头大门排队指标对比

为检验设置可变闸口方案与其他两个方案是否存在显著差异,以方案 C 为基准方案,利用 Bonferroni 法进行比较,总体显著性水平设为 0.05,则个体显著性水平为 0.025。各方案运行 20 次,采用成对 t 置信区间法构造方案 C 与其他两个方案两两差值的均值的 97.5% 置信区间,结果见表 1。

指标为出闸口处的 2.05 ~ 4.41 倍,方案 B 中进闸口处集卡各项排队指标为出闸口处的 6% ~ 35%;方案 C 中进闸口处集卡各项排队指标为出闸口处的 58% ~ 81%。

2) 从表1的统计结果可以看出:各置信区间的排队指标均不包含0,因此可以认为在97.5%的置信区间方案C与其他两个方案有显著性差异;方案C的各项排队指标均比方案A和B的小,说明设置可变闸口后闸口通道处集卡的排队拥堵现象得到显著缓解。

综上所述,不设置可变闸口时进、出闸口处集卡各项排队指标表现出显著的不均衡性;设置可变闸口后,进、出闸口处集卡的排队不均衡情况得到了明显的改善,且整体排队指标也有显著下降,这说明设置可变闸口对降低进、出闸口处的排队不均衡程度以及缓解闸口通道处的拥堵现象有着显著作用。

## 4 结 论

研究高效智能的闸口工作方式,实现在现有闸口资源条件下极大地提高码头大门通过能力的目标,提出通过设置可变闸口提高集装箱码头大门服务水平的方法,并构建码头大门作业系统的仿真模型。仿真排队不均衡因数不同时,设置可变闸口对提高闸口通过能力的效果,确定有必要设置可变闸口的排队不均衡因数临界值,以及可变闸口变更作业方向的排队不均衡因数临界值。研究结果表明,设置可变闸口可以极大地缓解进、出闸口处的排队拥堵现象。

## 参考文献:

- [1] MINH C G, HUYNH N. Planning-level tool for assessing and optimizing gate layout for marine container terminals [J]. Transportation Research Record, 2014, 2409: 31-39. DOI: 10.3141/2409-05.
- [2] GUAN Changqian, LIU Rongfang. Container terminal gate appointment system optimization [J]. Maritime Economics & Logistics, 2009, 11(4): 378-398. DOI: 10.1057/mel.2009.13.
- [3] BOILE M, THEOFANIS S, GOLIAS M, *et al.* Gate strategies' impact on marine container terminal access networks using simulation [C] // The 13th World Conference on Transport Research (WCTR) 2013, Rio de Janeiro, Brazil, July 15-18, 2013: 1-18.
- [4] LAI K K, LEUNG J. Analysis of gate house operations in a container terminal [J]. International Journal of Modelling and Simulation, 2000, 20(1): 89-94. DOI: 10.1080/02286203.2000.11442144.
- [5] CHEN Gang, YANG Zhongzhen. Methods for estimating vehicle queues at a marine terminal: a computational comparison [J]. International Journal of Applied Mathematics & Computer Science, 2014, 24(3): 611-619. DOI: 10.2478/amcs-2014-0044.
- [6] ZENG Ming, CHENG Wenming, GUO Peng. A transient queuing model for analyzing and optimizing gate congestion of railway container terminals [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014: 914706. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/914706>.
- [7] 麦宇雄, 卢永昌, 覃杰. 随机服务系统(排队论)在集装箱码头大门设计中的应用 [J]. 水运工程, 2007(5): 39-42. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2007.05.010.
- [8] 张莎莎, 庞明宝, 杜宏亮, 等. 基于船期表的一种集装箱码头闸口交通需求智能预判方法 [J]. 交通科技, 2014, 266(5): 148-151. DOI: 10.3963/J.issn.1671-7570.2014.05.048.
- [9] 付强, 仲丛友. 基于CPN Tools的港口集装箱物流系统建模与仿真研究 [J]. 物流科技, 2013(9): 15-17.
- [10] 刘翠莲, 计明军, 郁兰, 等. 集装箱码头闸口作业系统通过能力研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(4): 117-123. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2011.04.030.
- [11] 于越, 金淳, 霍琳. 基于仿真优化的集装箱堆场大门系统规划研究 [J]. 系统仿真学报, 2007(13): 3080-3084. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2007.13.049.
- [12] 许晓雷. 集装箱码头服务闸口数优化研究 [J]. 中国水运, 2013, 13(4): 75-76.
- [13] 杨瑞娜, 张力, 谢金宝. 基于ExtendSim的铁路集装箱中心站智能大门系统仿真 [J]. 甘肃科技, 2014, 30(1): 55-58.
- [14] 代磊磊, 顾金刚, 俞春俊, 等. 潮汐车道交通流特性与设置方案仿真研究 [J]. 交通信息与安全, 2012(1): 15-49. DOI: 10.3963/j.issn.1674-4861.2012.01.004.
- [15] 王娟, 王世能, 周涛. 城市道路交叉口潮汐进口道设置研究 [J]. 交通节能与环保, 2014(4): 49-54. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2014.04.012.

(编辑 贾裙平)