

集装箱码头集卡配置优化的闭环排队网络模型

张笑菊, 曾庆成, 王泽浩

(大连海事大学 航运经济与管理学院, 大连 116026)

**摘 要** 以集装箱码头同贝同步装卸作业为研究对象, 以提高码头作业效率、提升服务能力为目标, 研究码头内部集卡数量配置优化问题. 将码头作业系统视为服务网络, 构建码头同贝同步装卸作业的闭环排队网络模型, 刻画集卡在各个环节的作业过程, 分析不同设备配置下码头作业系统服务能力, 揭示制约码头整体作业效率关键环节. 以码头作业成本最小为目标, 考虑集卡在各个环节的排队等待时间及设备利用率, 建立了基于同贝同步装卸作业的集卡数量优化模型, 并设计算法对模型进行求解. 本研究从服务网络角度揭示了码头作业效率与岸桥、集卡、场桥配置的关系, 为码头设备调度与服务流程设计提供了依据.

**关键词** 集装箱码头; 集卡配置; 排队网络

Modeling the closed queueing network of truck allocation optimization in container terminals

ZHANG Xiaoj, ZENG Qingcheng, WANG Zehao

(School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract** The truck allocation problem based on double cycling is introduced to increase the handling efficiency and service availability in container terminals. The terminal operation system is regarded as a service network and a queueing network model based on double cycling is proposed. The service process of trucks is described and the service availability of the terminal handling system with different resource allocation is analyzed. Based on the analysis, the bottleneck operation which restricts the whole terminal handling efficiency is revealed. An optimization model considering the waiting time of trucks and the utilization of equipment is developed. The goal of the model is to optimize the truck allocation with minimum terminal operation cost. To solve the model, an algorithm is designed. The relationship between the terminal efficiency and the allocation of quay cranes, trucks and yard cranes from the service network's view is shown. And a reference for the equipment scheduling and service designing in container terminals is provided.

**Keywords** container terminal; truck allocation; queueing network

1 引言

集装箱在码头流转过程由多个相互影响的环节完成, 码头作业效率依赖于各环节的效率及相互之间的有效配合. 其中, 集卡是连接岸边与堆场作业的水平运输设备, 其配置与调度直接影响岸桥与场桥的装卸作业效

收稿日期: 2017-07-13  
作者简介: 张笑菊 (1989-), 女, 汉, 河北秦皇岛人, 博士研究生, 研究方向: 港口运作管理; 通信作者: 曾庆成 (1978-), 男, 汉, 山东沂南人, 教授, 博士, 研究方向: 港口与物流系统优化, E-mail: qzeng@dlnu.edu.cn; 王泽浩 (1993-), 男, 汉, 山西晋中人, 硕士研究生, 研究方向: 码头调度优化.  
基金项目: 国家自然科学基金 (71370137, 71671021); 中央高校基本科研业务费专项基金 (3132016302, 20110116104)  
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71370137, 71671021); Fundamental Research Funds for Central Universities (3132016302, 20110116104)  
中文引用格式: 张笑菊, 曾庆成, 王泽浩. 集装箱码头集卡配置优化的闭环排队网络模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(2): 409-417.  
英文引用格式: Zhang X J, Zeng Q C, Wang Z H. Modeling the closed queueing network of truck allocation optimization in container terminals[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(2): 409-417.

率. 本文研究同贝同步装卸作业(一种新的集装箱码头作业工艺)下集卡配置与调度优化问题. 与传统的先卸后装相比, 同贝同步装卸增加两个作业环节, 集卡在一个作业循环内需完成一个进口箱和一个出口箱的水平运输任务, 其调度需要考虑进口箱箱区场桥、出口箱箱区场桥及岸桥的装卸效率及数量.

目前, 码头集卡调度优化得到了广泛的研究, 主要思路是通过数学规划或仿真建模获得集卡的任务分配及最优调度策略<sup>[1]</sup>. 数学规划模型可以获得集卡配置与调度方案, 但无法反映集卡在各个节点的服务过程, 无法刻画设备的利用率及集卡排队等待时间的变化. 仿真建模需要耗费大量资源建立与问题一致的模型, 而且不具备优化功能. 考虑到同贝同步装卸作业增加的作业环节容易导致系统内部拥堵, 降低系统作业的稳定性<sup>[2]</sup>, 因此有必要对新装卸工艺下集卡的配置与调度进一步研究.

针对上述问题, 本文针对同贝同步装卸作业下集卡的配置问题进行了研究, 构建了集卡排队服务网络模型, 利用闭环排队网络分析码头作业指标随设备配置变化的过程, 从服务网络角度解决码头集卡配置问题. 本文构建模型的贡献性体现在: 1) 从码头作业系统整体角度优化了集卡配置问题, 考虑了各个环节作业的相互影响, 提高了码头整体作业效率; 2) 考虑了集卡在各个环节的排队等待时间及设备利用率随集卡数量的变化, 分析了制约码头作业效率的瓶颈环节, 为码头的设备配置及流程设计提供了建议.

## 2 国内外研究现状

集卡是集装箱在码头内部流转的重要水平搬运设备, 其作业效率直接影响岸桥装卸船舶的作业效率, 国内外一些学者对其调度进行了研究, 主要包括集卡的作业任务分配和数量配置优化两个方面. Murty 等<sup>[3]</sup>研究表明, 通过优化集卡数量, 香港港每年集卡运营成本(包括集卡能耗、人工成本等)可以节约 600 万美元. Vis<sup>[4]</sup>首先研究了 AGV 的任务分配问题, 其次根据 AGV 分配规则, 优化了为完成作业所需的 AGV 数量. Kang 等<sup>[5]</sup>将码头作业系统看做两节点的闭环排队服务网络, 以码头运营成本最小为目标, 优化了集卡数量.

同贝同步装卸作业技术改变了岸桥的作业过程及集卡的行驶路径, Goodchild 和 Daganzo<sup>[6]</sup>分析了同贝同步装卸对集卡的行驶距离及各个作业设备数量配置的影响. 一些学者建立了同贝同步装卸作业下集卡调度模型, 如, Luo 和 Wu<sup>[7]</sup>建立整数规划模型, 对同贝同步装卸作业下集卡的任务分配进行了研究. Goodchild 和 Daganzo<sup>[8]</sup>研究了同贝同步装卸作业时集卡数量配置问题, 将岸边及堆场的服务看成  $D/G/1$  排队服务过程, 得到了保证集装箱装卸效率的最少集卡数量.

综上, 目前评价港口作业系统的方法包括规划模型(Vis 等<sup>[4]</sup>; Steenken 等<sup>[9]</sup>)、仿真分析(Frankel<sup>[10]</sup>; Silberholz 等<sup>[11]</sup>). 近年来, 排队理论逐渐应用到各个研究领域, 由于其能够从系统整体角度刻画作业过程, 因此国内外学者利用不同的排队理论对系统作业指标进行分析, 如, Koenigsberg 和 Lam<sup>[12]</sup>将港口看成对船舶的服务节点, 优化了两个港口间需配置的最优船舶数量. Garrido 和 Allendes<sup>[13]</sup>利用排队理论优化了集装箱码头集卡的数量. Parikh<sup>[14]</sup>利用  $M/G/C$  排队模型优化了租赁汽车的数量. Adelman<sup>[15]</sup>用闭环排队理论分析了物流网络中资源数量问题. George 和 Xia<sup>[16]</sup>将租车服务系统看成一个闭环排队网络, 分析了该系统稳态时的服务能力, 并依据得到的系统服务指标, 建立优化模型, 以最大收益为目标, 优化了系统中汽车的数量. Hu 和 Liu<sup>[17]</sup>考虑了道路拥堵状况, 优化了租车系统的车辆数及每个租车点的泊车能力. 杨静蕾<sup>[18]</sup>利用排队网络分析了集装箱码头不同设备数量配置问题.

上述关于码头集卡设备的调度方法对本文研究集卡配置问题提供一定的借鉴作用, 但是同贝同步装卸作业下集卡数量配置问题仍需进一步研究, 主要原因是: 1) 码头同贝同步装卸作业系统比传统作业增加两个环节, 集卡在码头内部的周转过程更加复杂; 2) 集卡作为连接岸边作业及堆场作业的运输设备, 其配置调度需要考虑岸桥及场桥的作业效率, 集卡在各环节的排队等待过程及多个环节的互相影响过程需要进一步刻画. 因此, 本文综合考虑码头作业拥堵及设备利用率等因素, 利用闭环排队网络刻画了集卡在码头内部的作业排队过程, 分析了不同设备配置下码头作业指标的变化.

## 3 闭环排队网络模型

### 3.1 问题描述

同贝同步装卸作业是一种能够提高岸桥作业效率的新方法, 目前正在我国的天津港, 深圳盐田港等开

始应用. 岸桥同贝同步装卸时, 岸桥起重小车在一个作业循环完成一个进口箱的卸船作业和一个出口箱的装船作业, 同时, 集卡从岸边将一个进口箱送到堆场后, 行驶到出口箱区装载一个出口箱并将其运送到岸边. 与传统作业相比, 集卡在码头内部的周转增加了两个作业环节, 集装箱在码头内部的周转流程更加复杂.

集卡作为连接岸桥作业和堆场场桥作业的重要环节, 其在码头内部的周转效率受两个因素的影响, 一是岸桥和场桥的装卸效率, 二是集卡的数量. 随着集卡数量的增加, 集卡在码头内部的周转频率增加, 然而集卡产生的拥堵也更加严重, 增加了集卡在岸边及堆场的等待作业时间. 同时, 集卡的数量影响码头作业成本, 而目前港口竞争逐渐激烈, 作业成本是提高竞争力的关键因素. 因此, 集卡的配置对提高码头作业效率、降低码头作业成本至关重要.

3.2 闭合排队网络模型

本文从集卡的角度, 利用闭合排队网络刻画了集装箱在码头的作业过程. 将集卡在岸边, 进口箱箱区和出口箱箱区的作业分别看成是岸桥、进口箱箱区场桥和出口箱箱区场桥对集卡服务的过程, 服务者的数量与实际设备数量相同. 将集卡在岸边至进口箱箱区、进口箱箱区至出口箱箱区和出口箱箱区至岸边三段水平运输过程看做三个虚拟的服务过程, 服务台的数量为无穷大. 由于整个系统没有集卡进入或离开, 因此, 可以用闭合排队网络对整个码头系统进行描述.

模型的参数如下:

- $K$ : 集卡数量;
- $N$ : 集装箱总数;
- $m_1$ : 岸桥的数量;
- $m_2$ : 进口箱箱区场桥的数量;
- $m_3$ : 出口箱箱区场桥的数量;
- $\mu_1$ : 岸桥的作业效率 (每分钟服务的集卡数量);
- $\mu_2$ : 进口箱箱区场桥的作业效率 (每分钟服务的集卡数量);
- $\mu_3$ : 出口箱箱区场桥的作业效率 (每分钟服务的集卡数量);
- $\mu_4$ : 集卡从岸边行驶到进口箱箱区的虚拟的服务效率, 是行驶的时间的倒数;
- $\mu_5$ : 集卡从进口箱区行驶到出口箱箱区的虚拟的服务效率, 是行驶的时间的倒数;
- $\mu_6$ : 集卡从出口箱区行驶到岸边的虚拟的服务效率, 是行驶的时间的倒数;

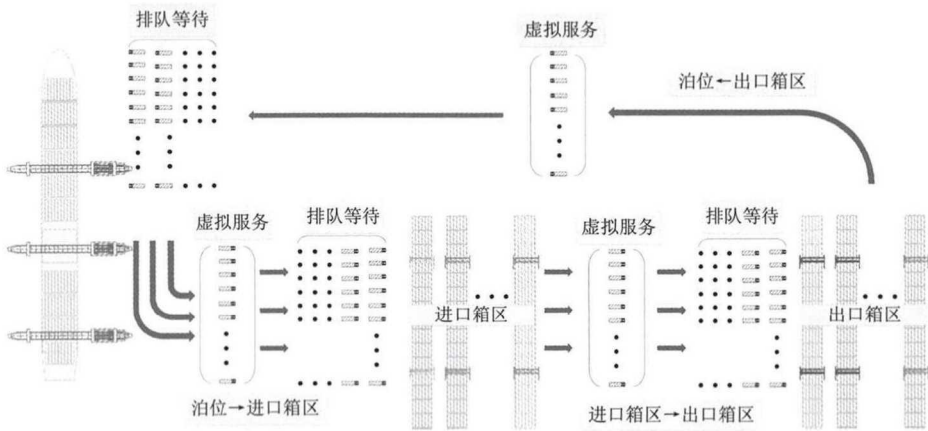


图 1 码头集卡的服务过程

为了建立循环排队网络模型, 本文做了以下假设:

- 1) 所有服务时间服从负指数分布;
- 2) 服务服从先到先服务 (FCFS) 的服务规则;

因此, 整个排队网络可以表示成时间连续状态离散的马尔可夫链. 以  $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$  表示系统的状态,  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  分别表示稳态时, 岸边、进口箱箱区、出口箱箱区、岸边至进口箱箱区、进口箱箱区至出口箱箱区、出口箱箱区至岸边的集卡数量. 上述六部分集卡数量之和等于系统中总的集卡数量, 即

$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 = K$ . Gordon 和 Newell<sup>[19]</sup> 给出了稳态下系统各状态的概率:

$$P(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) = \prod_{i=1}^6 \frac{(X_i)^{k_i}}{l_i} G(K)^{-1}.$$

(1)

其中,

$$l_j = \begin{cases} m_j! m_j^{k_j - m_j}, & k_j \geq m_j \\ k_j!, & k_j \leq m_j \end{cases}, \quad X_i = \frac{\mu_1}{\mu_i}.$$

(2)

以  $\Theta$  表示系统状态的集合, 则  $G(K)$  是使所有状态概率和为一的归一化常数:

$$\sum_{\Theta} P(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) = 1,$$

(3)

$$G(K) = \sum_{\Theta} \left( \prod_{i=1}^6 \frac{(X_i)^{k_i}}{l_i} \right).$$

(4)

第  $i$  个服务阶段有  $k$  辆集卡的概率可以表示:

$$P(k_i = k) = \frac{(X_i)^k}{l_i} \cdot \left( \sum_{\substack{j \neq i \\ k_j = K - k}} \prod_{j=1, j \neq i}^6 \frac{(X_j)^{k_j}}{l_j} \right) \cdot G(K)^{-1} = \frac{(X_i)^k \cdot G_i(K - k)}{l_i \cdot G(K)}.$$

(5)

$G_i(K - k)$  表示除去第  $i$  个服务阶段, 有  $K - k$  辆集卡的服务网络的归一化常数.

3.3 集卡数量优化模型

集卡数量优化模型主要以码头作业成本最小为目标, 优化集卡数量. 以  $C_t, C_q, C_{yc}$  分别表示单位时间集卡, 岸桥和场桥的作业成本, 则为了完成集装箱的装卸船作业, 码头的作业成本可以表示为:

$$Obj. \min F(K) = (C_t \cdot K + C_q \cdot m_1 + C_{yc}(m_2 + m_3)) \cdot \frac{\sum_i W_i(K)}{K} \cdot N.$$

(6)

式中, 总作业成本表示为设备单位时间总成本乘以作业时间,  $W_i(K)$  表示第  $i$  个阶段的平均等待时间.

定理 1 目标函数是集卡数量的凹函数.

证明 系统输出是一个凸函数, 因此, 作业时间可以表示成  $\frac{N}{TH(K)}$ , 则目标函数可以写成:

$$\min F(K) = (C_t \cdot K + V) \cdot \frac{N}{TH(K)},$$

其中  $C_q \cdot m_1 + C_{yc}(m_2 + m_3) = V$ . 式中, 集卡数量  $K$  和  $\frac{1}{TH(K)}$  均为凹函数, 因此, 二者乘积为凹函数 (Ruscheweyh 和 Sheil-Small<sup>[20]</sup>). 证明完毕.

推论 1 集卡数量优化模型至多存在两个最优解.

证明 目标函数对集卡数量的一阶导数表示为:

$$F'(K) = (C_t \cdot TH(K) - (C_t \cdot K + V) \cdot TH'(K)) \cdot \frac{N}{TH^2(K)}.$$

(7)

由于  $TH(K)$  为凸函数, 因此  $TH'(K)$  随着  $K$  的增加而减少并且  $\lim_{K \rightarrow \infty} TH'(K) = 0$ . 当集卡数量越少时,  $\lim_{K \rightarrow 0} TH'(K) = \infty$ . 因此, 满足  $\lim_{K \rightarrow 0} F'(K) < 0$  并且  $\lim_{K \rightarrow \infty} F'(K) > 0$ . 因此, 必然存在一个  $k$ , 使得  $F'(k) = 0$ , 则  $k$  是最优解. 由于本模型中  $k$  为整数, 因此如果使  $F'(k) = 0$  的  $k$  不是整数, 则本模型可能存在两个最优解. 证明完毕.

4 码头作业系统分析

4.1 码头作业指标分析

以  $I_i(K)$  表示第  $i$  个服务阶段的空闲概率, 即第  $i$  个服务过程没有集卡的概率可以表示为:

$$I_i(K) = P(k_i = 0) = \frac{G_i(K)}{G(K)}.$$

(8)

以  $B_i(K)$  表示第  $i$  个服务阶段设备繁忙的概率, 即第  $i$  个服务阶段设备利用率:

$$B_i(K) = 1 - I_i(K) = 1 - \frac{G_i(K)}{G(K)}.$$

(9)

定理 2 岸桥和场桥的利用率受最小服务效率的阶段限制.

**证明** 以  $X_\alpha$  表示  $X_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 中最大值, 根据公式 (9), 可得到如下关系:

$$B_i(K) < B_\alpha(K) \leq 1, i = 1, 2, 3. \tag{10}$$

随着集卡数量的增多, 服务时间效率最低的环节的设备利用率趋近于 1:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} B_\alpha(K) = 1. \tag{11}$$

根据公式 (9), 可以得到如下关系:

$$\frac{B_i(K)}{B_\alpha(K)} = \frac{X_i}{X_\alpha}, i = 1, 2, 3. \tag{12}$$

结合公式 (11) 和公式 (12), 当集卡数量趋于无穷时:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} B_i(K) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{B_i(K)}{B_\alpha(K)} = \frac{X_i}{X_\alpha}, i = 1, 2, 3. \tag{13}$$

因此, 岸桥和场桥的利用率受最小服务效率的设备限制. 为了提高码头整体作业效率, 码头应提高服务效率比较低的环节的作业效率. 证明完毕.

服务系统中, 第  $i$  个作业环节的实际生产率表示单位时间内完成的集卡的数量, 以  $TR_i(K)$  表示:

$$TR_i(K) = B_i(K) \cdot m_i \cdot \mu_i. \tag{14}$$

**推论 2** 岸桥和场桥的利用率是随着集卡数量增加而递增的凸函数.

**证明** Shantkikumar 和 Yao<sup>[21]</sup> 证明系统第  $i$  个作业环节的实际生产率是随着集卡数量增加而增加的凸函数, 根据公式 (14), 利用率可以表示成  $B_i(K) = \frac{TR_i(K)}{m_i \cdot \mu_i}$ , 而参数  $m_i, \mu_i$  是两个常量, 因此, 岸桥和场桥的利用率是随着集卡数量增加而递增的凸函数. 证明完毕.

**定义 1** 瓶颈作业环节. 在系统稳态时, 随着集卡数量的增加, 设备利用率逐渐趋于 1 的作业环节.

**推论 3** 只有提高瓶颈环节设备的作业效率, 才能提高整个系统作业效率.

**证明** 服务时间最长的是瓶颈环节, 其设备利用率达到最大值, 设备满负荷运转, 改变其他环节作业效率, 不能使利用率继续增加, 因此只有增加瓶颈环节的设备作业效率, 才能改变整个系统的作业效率. 证明完毕.

作业能力是指单位时间服务的集卡的数量, 以  $P_i(K)$  表示第  $i$  个阶段的服务能力, 当所有服务阶段服务台的数量为 1 时, 得到第  $i$  个阶段的服务能力为:

$$P_i(K) = \begin{cases} \frac{\mu_i}{G(K)} \sum_{j=1}^{m_i} (X_i)^j \cdot G(K-j), & i = 1, 2, 3, \\ \frac{\mu_i}{G(K)} \sum_{j=1}^K (X_i)^j \cdot G(K-j), & i = 4, 5, 6. \end{cases} \tag{15}$$

第  $i$  个阶段, 集卡的平均数量为:

$$L_i(K) = \sum_{\Theta} k \cdot P(k_i = k) = \sum_{k=1}^K \frac{k \cdot (X_i)^k \cdot G_i(K-k)}{l_i \cdot G(K)}. \tag{16}$$

**定理 3** 每个阶段的平均集卡数量是由服务效率决定: 当  $\mu_i > \mu_j$ , 则  $L_i(K) < L_j(K)$ .

**证明** 公式 (16) 给出了每个作业环节的集卡平均数量. 随着服务率的增加, 相对服务率  $X_i$  将减少, 因此, 每个阶段的集卡数量将减少. 证明完毕.

通过 Little 公式, 可以得到集卡在每个阶段的平均等待时间. 在岸边和堆场作业区, 集卡的平均等待时间为  $W_i(K) = \frac{L_i(K)}{m_i \cdot \mu_i}$ ; 在行驶的路上, 集卡的平均等待时间是实际的服务时间,  $\mu_i$  ( $i = 4, 5, 6$ ):

$$W_i(K) = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^K (X_i)^j \cdot G_i(K-j)}{m_i \cdot \mu_i \cdot l_i \cdot G(K)}, & i = 1, 2, 3, \\ \mu_i, & i = 4, 5, 6. \end{cases} \tag{17}$$

系统的输出指单位时间可以完成的集装箱的数量, 可以由集卡的周转效率计算, 而集卡在岸边及堆场的一个循环中, 完成一个进口箱和一个出口箱的运输, 因此, 效率是集卡周转效率的两倍:

$$TH(K) = \frac{120K}{\sum_i W_i(K)}. \tag{18}$$

**引理** 系统输出是随着集卡数量增加而增加的凸函数.

详细的证明可以参考文献 Shantkikumar 和 Yao<sup>[21]</sup>.

4.2 模型求解算法

$G(K)$  的求解难度随着排队网络节点数和系统顾客数量的增加而增加, 导致其直接求解难度较大. Buzen<sup>[22]</sup> 设计了一种卷积算法对  $G(K)$  进行求解, 基于此, 本文利用一种迭代算法对本文提出的优化模型进行求解, 具体步骤如下:

Step 1: 初始化变量参数, 初始化岸桥数量、场桥数量  $m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 1$ , 作业系统内部集卡数量初始为 3, 即  $K = 3$ .

Step 2: 引入  $G(K)$  计算函数:

$$g(k, m) = \sum_{(m, k)} \left( \prod_{i=1}^m \frac{(X_i)^{k_i}}{l_i} \right).$$

(19)

式中  $m$  是服务阶段数,  $k$  是系统中顾客的数量, 当  $m$  等于排队系统中服务台的数量  $M$  时:

$$G(k) = g(k, M), \forall k = 0, 1, \dots, K.$$

(20)

通过对函数  $g(k, m)$  进行变换, 得到以下迭代关系式:

$$g(k, m) = \sum_{n=0}^k \left( \frac{(X_n)^n}{l_n} \right) g(k - n, m - 1).$$

(21)

Step 3: 初始化  $g(k, m)$ :

$$g(k, 1) = (X_1)^k, \forall k = 0, 1, \dots, K,$$

(22)

$$g(0, m) = 1, \forall m = 0, 1, \dots, M.$$

(23)

Step 4: 通过计算式 (21) 得到  $G(K)$ .

Step 5: 令  $K = K + 1$ , 重复 Step 2~Step 4 直到集卡数量增加到最大值.

Step 6: 令  $m_2 = m_2 + 1, m_3 = m_3 + 1$ , 重复 Step 2~Step 5 直到场桥数量增加到最大值.

Step 7: 令  $m_1 = m_1 + 1$ , 重复 Step 2~Step 6 直到岸桥数量增加到最大值.

5 算例分析

为了验证系统的作业效率指标及模型的有效性, 本文利用天津港的作业数据进行算例分析, 作业参数如表 1 所示. 其中, 本文对集卡、场桥及岸桥的作业成本进行了标准化处理, 结合天津港的作业情况, 对文献 Kang 等<sup>[5]</sup> 和 Thomas 和 Roach<sup>[23]</sup> 中, 岸桥、场桥、集卡的单位时间成本比值进行了修正, 修正后, 得到比值为 4.4 : 1.7 : 1.

表 1 参数设定

| 参数                    | 值    | 参数                    | 值    |
|-----------------------|------|-----------------------|------|
| 岸桥作业效率 (循环次数/分钟)      | 0.35 | 进口箱箱区至出口箱箱区的行驶时间 (分钟) | 5    |
| 岸边至进口箱箱区的行驶时间 (分钟)    | 3.57 | 出口箱堆场场桥作业效率 (循环次数/分钟) | 0.49 |
| 进口箱堆场场桥作业效率 (循环次数/分钟) | 0.41 | 出口箱箱区至岸边的行驶时间 (分钟)    | 3.45 |
| 集装箱数量 (TEU)           | 4000 | 岸桥单位成本                | 4.4  |
| 场桥单位成本                | 1.7  | 集卡单位成本                | 1    |

数据来源: 天津港调研结果.

1) 码头作业成本分析

码头作业总成本是由装卸作业时间和装卸作业设备数量共同决定的, 不同设备数量的码头作业成本分析结果如图 2 所示. 随着集卡数量的增加, 码头作业总成本呈现先下降随后增加的趋势, 因此, 在不同设备资源数量配置下, 码头作业总成本有一个最小值. 对比图 2 中 (a)(b)(c)(d) 四个图发现, 当两个岸桥、四个场桥配备 11 辆集卡时, 码头总作业成本最小.

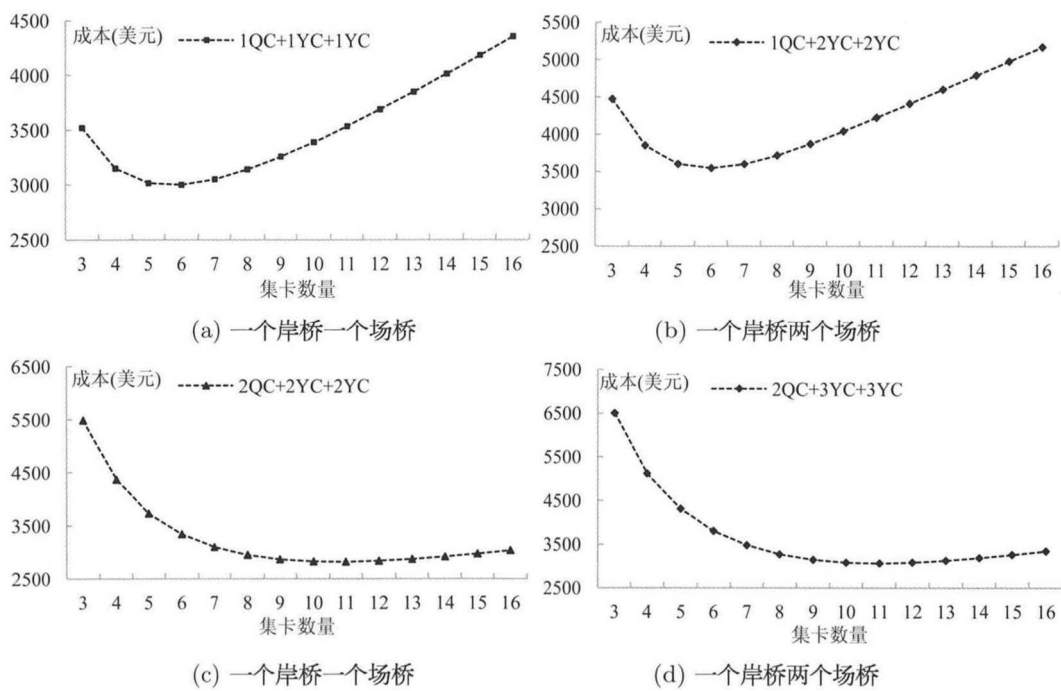


图 2 码头作业成本分析

2) 集卡周转频率分析

集卡在码头的周转效率影响码头装卸船舶的作业时间, 图 3 显示了不同设备数量下, 集卡周转频率的变化情况. 集卡周转频率随着集卡数量的增加而降低, 但是减少的速度越来越慢, 并且随着集卡数量无限增加, 码头总作业时间趋于一个定值.

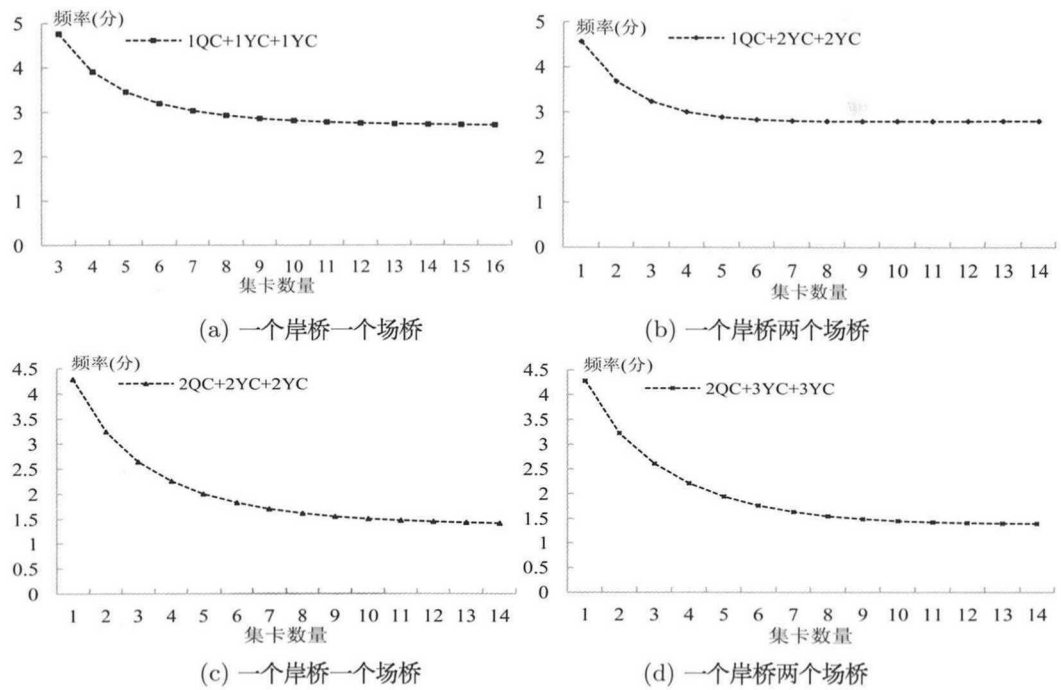


图 3 集卡周转频率分析

3) 码头作业能力分析

码头作业能力是评价码头作业速度的指标之一, 以单位时间内装卸的集装箱数量来衡量. 增加作业设备数量和减少作业时间均可以提高码头作业能力, 但是码头作业能力的改变程度不同. 图 4 显示了不同作业设备数量下码头生产能力的变化图. 随着集卡数量的增加, 码头的生产能力逐渐增加, 但是增加的速度越来越小, 最后趋于一个定值. 图 4(a) 与 4(b) 的对比可知, 在堆场进口箱区和出口箱区各增加一个场桥不能明显

提高码头生产率, 图 4(b) 与 4(c) 的对比可知, 增加一个岸桥可以明显提高码头作业能力.

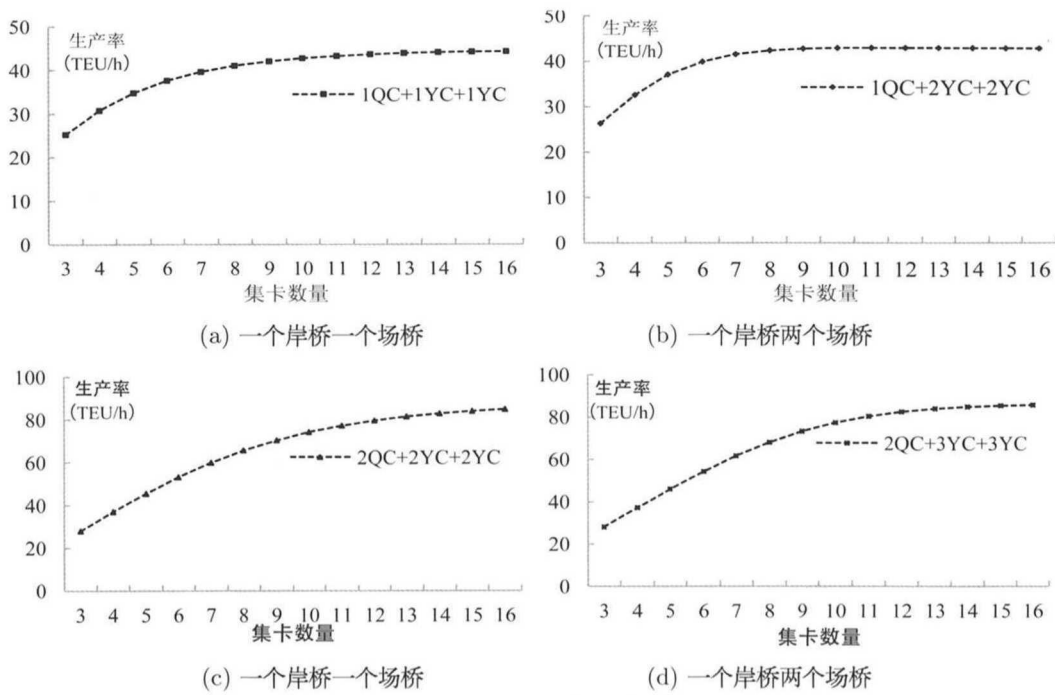


图 4 码头作业能力分析

6 结论

码头同贝同步装卸作业改变了集卡的行驶路径, 增加了码头装卸系统的作业环节, 集卡的调度与配置更加复杂. 为了提高码头的作业效率及服务能力, 本文将码头作业系统看做一个服务网络, 从码头整体作业角度, 利用循环闭合排队理论构建了码头作业系统排队模型, 刻画了集卡在各环节的排队等待过程. 其次考虑集卡在岸边及堆场箱区的拥堵时间, 以码头作业成本最小为目标, 建立了码头同贝同步装卸作业下集卡数量优化模型, 分析了不同设备配置下, 码头装卸系统的服务能力和作业效率.

本文对码头作业系统服务指标的分析, 揭示了服务率最低的作业环节制约码头作业效率, 是码头作业的瓶颈环节. 研究表明, 增加其他作业环节的设备数量不能有效提高码头整体作业效率. 随着集卡数量的增加, 码头总作业时间逐渐减少, 码头的作业能力逐渐提高. 但是, 在不增加其他作业设备数量的前提下, 集卡数量不能持续改变码头作业能力, 反而会增加码头作业成本. 因此, 本文模型揭示了码头作业效率与设备数量的关系, 针对如何增加作业设备资源等问题, 为码头经营者提供了建议.

本文的研究成果为提高码头作业生产率, 降低码头作业成本, 有效进行码头作业系统设备资源数量配置问题提供了新思路. 随着自动化码头在国内外港口中逐渐得到应用, 水平运输设备 AGV 的研究逐渐受到广泛关注. 与集卡相比, AGV 的使用减少了集装箱水平运输时间的标准差, 提高了设备作业的稳定性的. AGV 在岸边及堆场作业区域搭配 AGV 伴侣进行装卸作业, 减少了岸桥及场桥作业的等待时间. 因此, 结合自动化码头装卸工艺, 有必要对 AGV 数量进一步优化.

参考文献

[1] 李浩渊, 汪定伟. 集装箱码头动态集卡配置的并行仿真优化方法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14): 4243-4247.  
Li H Y, Wang D W. Parallel simulation-based optimization on dynamic truck configuration of container terminals[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4243-4247.

[2] Wolff R. Stochastic modeling and the theory of queues[M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

[3] Murty K G, Liu J, Wan Y, et al. A decision support system for operations in a container terminal[J]. Decision Support Systems, 2005, 39(3): 309-332.

[4] Vis I F A, De Koster R, Roodbergen K J, et al. Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(4):



- 409–417.
- [5] Kang S, Medina J C, Ouyang Y. Optimal operations of transportation fleet for unloading activities at container ports[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(10): 970–984.
  - [6] Goodchild A V, Daganzo C F. Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 473–483.
  - [7] Luo J, Wu Y. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 79: 49–64.
  - [8] Goodchild A V, Daganzo C F. Crane double cycling in container ports: Planning methods and evaluation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007, 41(8): 875–891.
  - [9] Steenken D, Henning A, Freigang S, et al. Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves[J]. *Operations Research Spektrum*, 1993, 15(3): 167–172.
  - [10] Frankel E G. Port design and analysis methodology[R]. 1974.
  - [11] Silberholz M B, Golden B L, Baker E K. Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals[J]. *Computers & Operations Research*, 1991, 18(5): 433–452.
  - [12] Koenigsberg E, Lam R C. Cyclic queue models of fleet operations[J]. *Operations Research*, 1976, 24(3): 516–529.
  - [13] Garrido R, Allendes F. Modeling the internal transport system in a container port[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2002, 1782(1): 84–91.
  - [14] Parikh S C. On a fleet sizing and allocation problem[J]. *Management Science*, 1977, 23(9): 972–977.
  - [15] Adelman D. Price-directed control of a closed logistics queueing network[J]. *Operations Research*, 2007, 55(6): 1022–1038.
  - [16] George D K, Xia C H. Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 211(1): 198–207.
  - [17] Hu L, Liu Y. Joint design of parking capacities and fleet size for one-way station-based carsharing systems with road congestion constraints[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 93: 268–299.
  - [18] 杨静蕾, 丁以中. 一种基于闭环排队网络的集装箱码头设备配置优化模型 [J]. *中国管理科学*, 2006, 14(6): 56–60.  
Yang J L, Ding Y Z. Research on optimal equipment allocation in container terminals by using closed queueing networks[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2006, 14(6): 56–60.
  - [19] Gordon W J, Newell G F. Closed queueing systems with exponential servers[J]. *Operations Research*, 1967, 15(2): 254–265.
  - [20] Ruscheweyh S, Sheil-Small T. Hadamard products of Schlicht functions and the Pólya-Schoenberg conjecture[J]. *Commentarii Mathematici Helvetici*, 1973, 48(1): 119–135.
  - [21] Shanthikumar J G, Yao D D. Second-order properties of the throughput of a closed queueing network[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1988, 13(3): 524–534.
  - [22] Buzen J P. Computational algorithms for closed queueing networks with exponential servers[J]. *Communications of the ACM*, 1973, 16(9): 527–531.
  - [23] Thomas B J, Roach D K. Operating and maintenance features of container handling systems[M]. The World Bank Policy Planning and Research Staff. Infrastructure and Urban Development Department, Washington, DC, 1987.