

基于船舶集港时间窗的集卡送箱预约优化模型

郭振峰, 范厚明, 马梦知, 李艳滨

(大连海事大学 战略管理与系统规划研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对集卡不规律到达而导致的码头闸口与堆场拥挤问题, 提出按船舶预约的集港模式, 以集卡车队和码头场桥总的空耗成本最小为目标, 建立集卡送箱预约优化模型。该模型利用两级排队网络描述集卡在闸口和堆场的排队过程, 在考虑集卡车队和码头双方利益的情况下, 确定每艘到港船舶的集港时间窗和预约份额。设计基于自适应遗传算法的求解方法, 搜索最优的集港时间窗方案, 以天津东方海陆集装箱码头为例, 对模型和算法的有效性进行了验证。实例结果表明: 集卡送箱预约优化模型可以大幅减少集卡在闸口和堆场的排队等待时间, 提高场桥的利用率。

关键词: 集卡送箱; 船舶集港时间窗; 集卡预约; 排队论; 遗传算法

中图分类号: N945; U169.6

文献标识码: A

Optimization Model for Appointment of Delivery Trucks Based on Vessel Dependent Time Windows

GUO Zhen-feng, FAN Hou-ming, MA Meng-zhi, LI Yan-bin

(Institute of Strategy Management and Systematic Planning, Dalian Maritime University,
Dalian 116026, China)

Abstract: To cope with the overcrowding problem in container terminal gate and yard caused by irregular arrival of trucks, a vessel dependent truck appointment system was put forward. An optimization model for appointment of delivery trucks was established with the goal of minimizing the total waste cost of truck fleet and yard cranes. A two-level queuing network was used to describe the queuing process of trucks in terminal gate and yard. Considering the interests of truck fleet and terminal, the model determined appointment time window and appointment quota for each ship. Adaptive genetic algorithm was designed to search the optimal time windows scheme. The instance of Tianjin Oriental Container Terminal verified the effectiveness of the proposed model and algorithm. The results show that optimization model for delivery trucks appointment can dramatically reduce waiting time of trucks in terminal gate and yard, and improve the utilization rate of yard cranes.

Key words: delivery trucks; vessel dependent time windows; truck appointment; queuing theory; genetic algorithm

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助下面项目(61473053); 辽宁省社科学规划基金资助重点项目(L16AGL004); 大连市重大软科学项目(2015D12ZC181)

作者简介: 郭振峰(1978-), 辽宁大连人, 博士研究生, 主要研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: guozhenfeng_dl@126.com。范厚明(联系人), 教授, E-mail: fhm468@163.com。

1 引言

随着集装箱吞吐量的不断增加以及集装箱船舶大型化趋势加剧,大量的集卡进出码头造成了高峰时段码头闸口和堆场的拥堵,影响了码头的作业效率^[1-2]。近年来,国内外的集装箱码头开始采用扩建码头、延长码头营运时间、高峰时段收费、集卡预约集港等方法来缓解码头拥堵问题。受稀缺的土地、岸线资源以及建设资金的限制,扩建码头往往非常困难,且我国码头的营运时间均为24小时。高峰时段收费虽然可以实现“削峰填谷”,但集卡到达仍是不可控的,不利于码头集港计划和堆场计划的实施。集卡预约集港最早在加拿大的温哥华港实施^[3],之后美国的洛杉矶一长滩港^[4]、我国的天津港^[5]等相继建设了集卡预约系统。通过限定不同时间段内的集卡到达数量来降低高峰时段集卡到达,最大程度降低集卡到达的不规律性,缓解码头集卡拥堵,提高码头作业效率,并通过合理的堆场计划来提升场桥利用率,使得集卡车队经营人和码头运营商均可以从中受益。

2 国内外研究现状

国内外学者对解决码头拥挤的方法进行了一系列研究。洛杉矶一长滩港^[6]利用高峰时段收费和延长码头营运时间等措施来解决码头集卡拥堵问题。Sharif等^[7]通过建立仿真模型研究码头排队信息对集卡司机到港决策的影响,结果显示发布排队信息可降低集卡在码头的平均周转时间。Chen^[8]以集卡空耗成本和集装箱在港堆存成本最小为目标,为每艘到港船舶设计集港时间窗。魏航^[9]构建了码头方补助金函数和集卡方成本函数,并通过优化码头取箱时间窗来减少堆场大量的翻倒箱作业。

在集卡预约系统的实施效果方面,Huynh^[10]运用数学模型确定考虑集装箱码头堆场作业能力下的最优集卡预约份额,结果表明集卡预约可以降低集卡平均周转时间,提高堆场机械的利用率。Namboothiri等^[11]以最小运输成本为目标,构建了预约机制下的集卡调度模型,研究集卡预约对集卡车队效率的影响。在利用排队理论描述码头集卡服务过程和预约优化方面,Kim^[12]研究发现可以用M/G/1排队模型描述集卡在堆场的服务过程。Guan^[13]利用平稳的M/E_k/C排队模型描述集卡在闸口的服务过程,以最小化集卡空耗成本和闸口运行成本为目标优化不同时段的预约份额。由于集卡

到达以及码头服务能力随时间变动,Chen^[14]根据集卡到达具有随时间变化的非稳态特征,建立了预约机制下集卡服务非稳态排队模型,其中集卡在闸口通道为M/M/1排队,在堆场箱区为M/G/1排队,在此基础上构建了集卡到达优化、拥堵收费设计两阶段集卡管理方法。Zhang等^[15]建立了基于BCMP排队网络的集卡预约优化模型,利用M/E_k/C排队模型描述集卡在闸口和堆场的服务过程,优化每个时间段的预约份额。Chen等^[16]建立了同时最小化集卡等待时间和集卡到达模式改变量的闸口和堆场二级排队网络多目标优化模型,对每个时段可接受的集卡预约量进行了优化。许巧莉等^[17]运用非平稳排队理论和积压后移平稳估计(SBC)方法,构建了基于闸口、堆场两阶段的集卡预约多目标优化模型,来应对集港高峰时段的集卡预约。曾庆成等^[18]利用休假式排队模型描述码头内部集卡和外部集卡的特征,建立了内外集卡协同服务的码头集卡预约优化模型。Phan和Kim^[19]通过建立包含集卡作业派遣计划优化和码头集卡周转时间预测两个子问题的数学模型,研究集卡公司与码头共同决策下的集卡预约优化问题。

综上,国内外学者利用平稳、非平稳排队理论对预约集港的实施效果和设计优化进行了充分的研究。但现有研究大多将决策期等分为若干预约时段,每个时段确定一个预约份额,集装箱可以在任意时段申请集港。该种集港模式为集卡集港提供了更多的选择,但由于集装箱的集港时段是受船舶到港时间限制的,过早集港会导致对码头堆场空间的不必要占用,过晚集港会影响集装箱按时装船,现有预约优化模型显然没有将此情况考虑在内。本文在已有集卡预约优化研究的基础上,提出了按船舶预约的集港新模式,综合考虑集港过程中集卡车队和码头场桥的空耗成本,为每艘到港船舶设计集港时间窗,并确定该时间窗所划分的各时段的预约份额,使模型更具现实意义。

3 集卡送箱预约优化模型的建立

3.1 问题描述

国内外学者所研究的预约集港模式可以描述为:码头将一天划分为若干个预约时段,并确定各时段的最大集港量(预约份额),并通过网上信息平台发布给堆场,任意船舶的出口箱均可以任意地选择预约时段进行集港。然而码头实际操作中,在集装箱船舶到达码头之前,码头会根据船舶预计到港时

间、船舶载箱量、堆场机械情况等信息制定集港计划,即确定各船舶的出口箱将在哪个时间段内安排集港。为此,本文提出按船舶预约的集港模式,码头和港外堆场之间建立有效的联系,码头发布各条到港船舶的集港时间窗,并给出多个预约时段以及每个时段的预约份额,港外堆场根据自身运力情况选择合适的预约时段,并给出该时段的集港箱量,码头经过平衡确定最终的集港计划,堆场按照码头最终确定的集港计划进行集港工作。

集卡入港过程涉及闸口和堆场两个环节,如图 1 所示:集卡在港外场站装箱并送箱入港,当闸口繁忙时,集卡排队等待入港;闸口验箱、打印进场小票后,集卡到达指定箱区等待卸箱;集卡卸完箱后驶离堆场,在闸口办完出港手续后离开码头。由于集卡到达以及码头的服务能力均随时间变化,集卡在闸口和堆场的排队属于非平稳排队过程,可利用 Fluid-based approximation 方法^[20-21]将非平稳过程转化为很多平稳过程的集合。

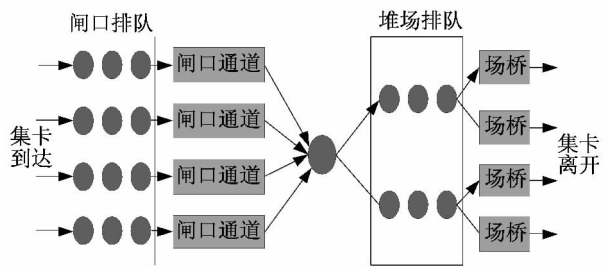


图 1 集装箱码头集卡集港过程

3.2 模型假设

(1) 由于集装箱船舶为周班轮,因此研究集装箱码头一周内的到港船舶的集港作业。

(2) 集装箱码头闸口通道负责对到港集装箱的单证、箱号和铅封号等进行核对和检查,各通道服务集卡的作业效率是相同的。

(3) 集装箱码头堆场各场桥为集卡卸箱的作业效率也是相同的。

(4) 集卡到达的时间间隔服从非平稳泊松分布,集卡在闸口和堆场为先到先服务。

(5) 码头闸口服务集卡的时间服从负指数分布,码头场桥服务集卡的时间服从一般独立分布。

(6) 集卡预约系统的实施并不会影响闸口的开放时间,因此闸口的营运费用并不会发生变化。

(7) 必须在船舶到港前 6h 结束集港作业,以方便码头安排装船工作^[22]。

3.3 参数定义

(1) 输入变量

z : 船舶编号, $z=1, 2, \dots, Z$;

T_z^A : 船舶 z 预计到港时间;

V_z : 船舶 z 在港装箱量;

c^o : 集卡在港排队等待的机会成本;

c^f : 集卡在港排队等待的燃油消耗成本;

c^y : 场桥的台时成本;

p : 预约时段,将决策期等分为 P 个预约时段, $p=1, 2, \dots, P$;

L : 每个预约时段的长度;

N : 决策期;

t : 将预约时段进一步细分为若干个小时段,这里将决策期 N 分为 T 个小时段,以细分后的每个时段中的某个时刻 $t=1, 2, \dots, T$ 代表该时段;

i : 闸口通道的编号, $i=1, 2, \dots, I$;

J_z : 服务于船舶 z 的场桥数量;

u_{it}^g : 闸口通道 i 在 t 时刻的服务能力;

u_{zt}^y : 服务于船舶 z 的场桥在 t 时刻的服务能力;

T^l : 船舶集港时间窗的长度要小于 T^l 小时;

T^k : 开始集港时间不早于船舶到港时间 T^k 小时。

(2) 中间变量

m : 每个预约时段包含小时段 t 的数量;

n_z : 将到港船舶 z 的集港时间窗等分为 n_z 个预约时段;

λ_{zp}^g : 与船舶 z 相关的集卡在 p 时间段到达闸口的数量(预约份额);

λ_{zt}^g : 与船舶 z 相关的集卡在 t 时刻代表的时段内到达闸口的数量;

λ_{it}^g : 闸口通道 i 在 t 时刻代表的时段内的集卡到达量;

l_{it}^g : 闸口通道 i 在 t 时刻的集卡排队队长;

d_{it}^g : 闸口通道 i 在 t 时刻代表的时段内的集卡离开量;

ρ_{it}^g : 闸口通道 i 在 t 时刻的利用率;

ω_p^g : p 时间段集卡在闸口的平均等待时间;

ω^g : 决策期内集卡在闸口的平均等待时间;

λ_{it}^y : t 时刻代表的时段内到达堆场的集卡数量;

λ_{zt}^y : 船舶 z 对应的集卡在 t 时刻代表的时段内到达堆场的数量;

l_{zt}^y : 船舶 z 对应的集卡在 t 时刻的堆场排队队长;

d_{zt}^y : 船舶 z 对应的集卡在 t 时刻代表的时段内离开堆场的数量;

ρ_{zt}^y : 服务于船舶 z 的场桥在 t 时刻的利用率;

$(\delta_z)^2$: 服务于船舶 z 的场桥服务集卡时间的方差;

w_p^y : p 时间段集卡在堆场的平均等待时间;

w^y : 决策期内集卡在堆场的平均等待时间。

(3) 决策变量

T_z^S : 船舶 z 的开始集港时间;

T_z^E : 船舶 z 的结束集港时间。

3.4 模型建立

3.4.1 目标函数的确定

以集卡车队和码头场桥总的空耗成本最小为目标, 建立集卡送箱预约优化模型。其中集卡车队的空耗成本是指集卡在闸口和堆场排队时产生的燃油消耗成本和机会损失, 码头场桥空耗成本是指场桥空转时的台时成本。

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I l_{it}^g + \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z l_{zt}^y \right) \frac{24N}{T} (c^o + c^t) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z J_z (1 - \rho_{zt}^y) \frac{24N}{T} c^y \end{aligned} \quad (1)$$

3.4.2 时间窗的确定

为每艘到港船舶的出口箱指定集港时间窗, 时间窗的大小取决于船舶在港装箱量、闸口通过能力、场桥作业能力等因素。式(2)~式(5)是指船舶集港时间窗的长度要小于 T^l 小时且必须是预约时段长度 L 的整数倍, 开始集港时间不早于船舶到港时间 T^k 小时, 集港工作要在船舶到港前 6 小时完成。式(6)为非负约束, 式(7)说明某船舶的预约总量要等于其在港装箱量。

$$T_z^E - T_z^S \leq T^l \quad (2)$$

$$T_z^E - T_z^S = n_z L \quad (3)$$

$$T_z^S + T^k \geq T_z^A \quad (4)$$

$$T_z^E + 6 \leq T_z^A \quad (5)$$

$$\lambda_{zp}^g \geq 0 \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^{n_z} \lambda_{zp}^g = V_z \quad (7)$$

3.4.3 闸口排队

集卡在闸口为先到先服务, 利用多队多服务台的 $M(t)/M(t)/1$ 排队模型描述集卡在闸口的服务过程。式(8)表示预约时段内小时段的数量, 式(9)表示与船舶 z 相关的集卡在 t 时刻代表的时段内的到达量, 式(10)表示闸口通道 i 在 t 时刻代表的时

段内的集卡到达量, 式(11)表明集卡排队队长与集卡到达量和离开量之间的关系, 式(12)为闸口通道 i 在 t 时刻代表的时段内的集卡离开量, 式(13)为集卡在闸口通道的排队队长与闸口通道利用率的关系, 式(14)为预约时段 p 内集卡在闸口的平均等待时间, 式(15)为决策期内集卡在闸口的平均等待时间。

$$m = \frac{LT}{24N} \quad (8)$$

$$\lambda_{zt}^g = \frac{\lambda_{zp}^g}{m}, t = \frac{T_z^S T}{24N}, \dots, \frac{T_z^E T}{24N} \quad (9)$$

$$\lambda_{it}^g = \sum_{z=1}^Z \lambda_{zt}^g / I \quad (10)$$

$$l_{i(t+1)}^g = \max(l_{it}^g + \lambda_{it}^g - d_{it}^g, 0) \quad (11)$$

$$d_{it}^g = u_{it}^g \rho_{it}^g \quad (12)$$

$$l_{it}^g = \frac{\rho_{it}^g}{1 - \rho_{it}^g} \quad (13)$$

$$w_p^g = \sum_{t=(p-1)m+1}^{pm} \sum_{i=1}^I l_{it}^g / \sum_{t=(p-1)m+1}^{pm} \sum_{i=1}^I d_{it}^g \quad (14)$$

$$w^g = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I l_{it}^g / \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I d_{it}^g \quad (15)$$

3.4.4 堆场排队

根据 Burke 定理, 在平稳状态下 $M/M/C$ 排队系统顺时针方向与逆时针方向的状态转移遵循同一概率规律, 因此顾客离开过程同样为泊松过程, 且离开率等于到达率^[23]。因此, 堆场的集卡到达服从泊松分布, 利用单队多服务台的 $M(t)/G(t)/C$ 排队模型来描述各船舶对应的集卡在堆场的服务过程。式(16)为在 t 时刻代表的时段内堆场的集卡到达量, 式(17)表示船舶 z 对应的集卡在 t 时刻代表的时段内到达堆场的数量, 式(18)表示船舶 z 对应的集卡到达堆场的总数等于船舶在港装箱量, 式(19)说明了集卡排队长度与集卡到达量和离开量之间的关系, 式(20)为船舶 z 对应的集卡在 t 时刻代表的时段内离开堆场的数量, 式(21)为船舶 z 对应的集卡在 t 时刻的堆场排队长度, 式(22)为预约时段 p 内集卡在堆场的平均等待时间, 式(23)为决策期内集卡在堆场平均等待时间。

$$\lambda_t^y = \sum_{i=1}^I d_{it}^g \quad (16)$$

$$\lambda_{zt}^y = \lambda_{zt}^g \lambda_t^y / \sum_{i=1}^I \lambda_{it}^g, t = \frac{T_z^S T}{24N}, \dots, \frac{T_z^E T}{24N} \quad (17)$$

$$\sum_{t=T_z^S T/(24N)}^{T_z^E T/(24N)} \lambda_{zt}^y = V_z \quad (18)$$

$$l_{z(t+1)}^y = \max(l_{zt}^y + \lambda_{zt}^y - d_{zt}^y, 0) \quad (19)$$

$$d_{zt}^y = J_z u_{zt}^y \rho_{zt}^y \quad (20)$$

$$l_{zt}^y = \frac{\rho_{zt}^y [(u_{zt}^y \delta_z)^2 + 1]}{2(1 - \rho_{zt}^y)} \left[1 + \sum_{n=0}^{J_z-1} \frac{(J_z - n)! (1 - \rho_{zt}^y)}{n! (J_z \rho_{zt}^y) J_z - n} \right]^{-1} + J_z \rho_{zt}^y \quad (21)$$

$$w_p^y = \sum_{t=(p-1)m+1}^{pm} \sum_{z=1}^Z l_{zt}^y / \sum_{t=(p-1)m+1}^{pm} \sum_{z=1}^Z d_{zt}^y \quad (22)$$

$$w^y = \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z l_{zt}^y / \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z d_{zt}^y \quad (23)$$

4 算法设计

遗传算法是根据达尔文的生物进化理论,通过选择、交叉、变异等操作模拟“优胜劣汰”的自然选择过程。遗传算法中交叉概率和变异概率的选取是影响遗传算法行为和性能的关键,在传统遗传算法中,种群中所有个体的交叉概率和变异概率是相同的且不随进化代数的增加而变化,这样会影响算法的收敛性,易陷入局部最优。因此,设计了交叉概率和变异概率的自适应调整规则,即根据个体适应度值自动调整交叉概率,根据进化代数自动调整变异概率,自适应遗传算法的主要步骤如下:

步骤 1 编码与初始种群。染色体的基因为船舶的开始集港时间和结束集港时间,每条染色体可以表示为 $(T_1^S, T_2^S, \dots, T_Z^S, T_1^E, T_2^E, \dots, T_Z^E)$ 。在式(2)~式(5)的约束下,利用随机数生成初始种群,种群规模为 120。

步骤 2 计算适应度值。计算每条染色体 $(T_1^S, T_2^S, \dots, T_Z^S, T_1^E, T_2^E, \dots, T_Z^E)$ 对应的集卡和码头场桥的空耗成本,并加权求得系统总成本,将其倒数作为个体的适应度值。

步骤 3 选择与交叉操作。保留上一代中最优个体,直接进入交配池,其它子代利用轮盘赌函数从父代中选择,交叉操作采用两点交叉,并根据个体的适应度值调整交叉概率 p_c ,以生成具有更高适应度值的个体。其中 p_{c1} 为最大交叉概率, p_{c2} 为最小交叉概率, f' 为进行交叉操作的两个个体中较大的适应度值, f_{\max} 为群体中最大的适应度值, f_{avg} 为群体的平均适应度值。

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{(f_{\max} - f_{\text{avg}})}, & f' > f_{\text{avg}} \\ p_{c1}, & f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases}$$

步骤 4 变异操作。变异操作采用非均匀变异,开始集港时间和结束集港时间分别进行变异操作,以使生成的新个体满足模型中的约束条件。变

异概率 p_m 根据进化代数自动调整, p_{m1} 为最大变异概率, p_{m2} 为最小变异概率, $iter$ 为当前进化代数, $iter_{\max}$ 为最大的进化代数。

$$p_m = p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})iter}{iter_{\max}}$$

步骤 5 不满足约束的个体处理。在交叉操作中会产生一些不满足模型约束的个体,处理方式是将不可行的个体替换为可行的个体。

步骤 6 算法终止条件。当算法的进化代数达到最大迭代次数时,算法终止。

5 实例分析

以天津东方海陆集装箱码头的实际数据进行实例分析,该码头拥有 4 个专用集装箱泊位,8 台集装箱装卸桥和 18 台场桥。利用挂靠该码头的 17 艘船舶的到港集卡数据,本文建立的集卡送箱预约优化模型,对码头闸口—堆场排队系统进行研究。考虑到集卡从港外堆场到码头的行驶时间,因此设定预约时段长度为 2h,决策期为 8d,其它的主要输入变量及其取值如表 1 所示。

表 1 主要输入变量的取值

| 输入变量 | 取值 | 变量解释 |
|---------------------|------------|--------------|
| co | 40 元/小时 | 集卡等待时的机会损失 |
| c' | 21 元/小时 | 集卡等待时的燃油消耗成本 |
| c^y | 174.2 元/台时 | 码头场桥空等时的台时成本 |
| μ_{th}^S | 40 辆/小时 | 闸口通道的服务能力 |
| μ_{th}^E | 20 辆/小时 | 堆场场桥的服务能力 |

5.1 集卡排队模型和算法的适用性检验

为检验本文采用的 $M(t)/M(t)/1$ 和 $M(t)/G(t)/C$ 排队模型以及设计的遗传算法的适用性,利用 MATLAB R2010b 编制程序,在奔腾双核处理器 E5400,主频 2.7GHz,内存为 3.00GB 的计算机上运行,计算预约前集卡在闸口的平均等待时间、集卡在堆场的平均等待时间和场桥平均利用率,并与码头的实际数据进行对比。如表 2 所示,预约前集卡在码头的排队等待时间共 16.56 分钟,场桥平均利用率为 61.56%,而根据对天津东方海陆集装箱码头有限公司的调研,集卡在码头的平均周转时间约为 20 分钟,场桥平均利用率约为 60%,说明本文采用的排队模型和算法可以有效地描述集卡在闸口和堆场的排队特征。

5.2 集卡送箱预约优化模型结果分析

预约前后的船舶集港时间窗如图 2 所示,重叠

表2 模型输出结果

| 指标 | 闸口等待时间(分钟) | 堆场等待时间(分钟) | 场桥平均利用率(%) |
|-----|------------|------------|------------|
| 平均值 | 4.25 | 12.31 | 61.56 |
| 最大值 | 10.57 | 38.09 | — |

的船舶集港时间窗大大减少,船舶集港总时长由预约前的 610 小时,减少为预约后的 220 小时,平均每艘船的集港时长由 35.88 小时减少为 12.94 小时,说明本文所提出的按船舶预约的集港模式可以有效地减少集卡集港总时长。

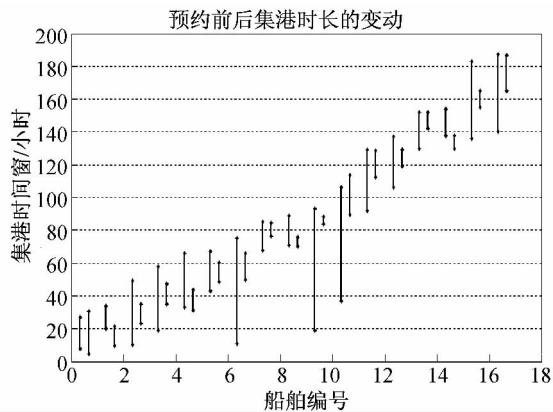


图2 预约前后船舶集港时间窗对比曲线图

预约前后的集卡到港规律如图3所示,在按船舶预约的集港模式下,预约时段内的集卡到达量基本分布在60辆或者120辆左右。通过图2可知,通常情况下最多有两艘船舶同时集港,为每艘船舶安排的场桥总的服务能力为40辆/小时,预约时段为2小时,当有一艘船舶集港时,预约时段内堆场场桥的服务能力为80辆,当有两艘船舶同时集港时,预约时段内堆场场桥的服务能力为160辆,与集卡到达分布相符,保证到达的集卡可以快速的通过堆场,同时也可以使场桥平均利用率保持在一个较高的水平。

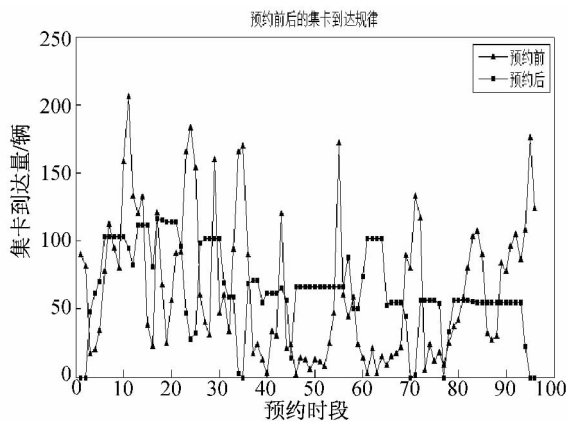


图3 预约前后的集卡到港规律

预约前后集卡在闸口的排队等待时间如图4所示,集卡在闸口的平均等待时间从预约前的4.25分钟降为预约后的3.09分钟;集卡在闸口的最长排队等待时间从预约前的10.57分钟,降为预约后的3.89分钟,说明按船舶预约的集港模式通过改变集卡到港规律,可以大幅地降低集卡在闸口的排队等待。

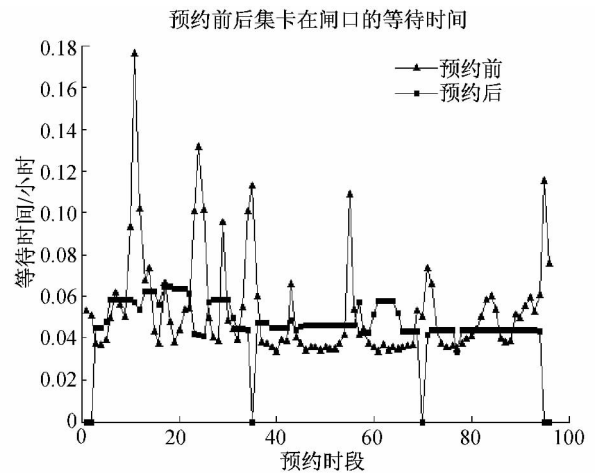


图4 预约前后集卡在闸口等待时间

预约前后集卡在堆场的排队等待时间如图5所示,预约前集卡在堆场的平均等待时间为12.31分钟,预约后降为4.75分钟;预约前集卡在堆场的最长排队等待时间达到38.09分钟,预约后最长排队等待时间减少为11.26分钟,说明按船舶预约的集港模式通过改变集卡到港规律,可以大幅地降低集卡在堆场的排队等待。

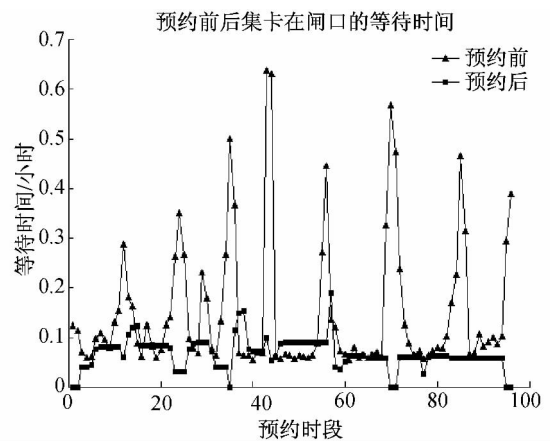


图5 预约前后的集卡在堆场排队等待时间

此外,码头场桥利用率平均值由预约前的61.56%增至预约后的75.64%;预约前后集卡的空耗成本分别为104 078元和49 279元,预约前后码头场桥的空耗成本分别为33 722元和21678元,系

统总空耗成本由预约前的 137 800 元降至预约后的 70 957 元。由图 3~图 5 可知,集卡到达量与集卡在闸口的排队等待时间、集卡在堆场的排队等待时间的波动是一致的,这恰恰说明了集卡不规则到达,是导致集卡在闸口、堆场排队等待的关键因素。

6 结论

集卡的不规则到达造成码头闸口、堆场拥堵,集港效率不高的关键因素,根据集装箱集港受到其船舶到港时间限制的特点,提出了按船舶预约的集港新模式。在现有集卡预约优化研究的基础上,将船舶集港时间窗的概念运用于集卡送箱预约优化模型的构建。设计了基于自适应遗传算法的求解方法,加快了搜索过程,并保证算法最终收敛于全局最优解。以天津东方海陆集装箱码头进行实例分析,结果表明,在不扩建码头和额外购置机械设备的条件下,通过实施新的集港模式,可以有效缓解码头闸口、堆场的拥堵现象,同时提高码头堆场机械的利用率,为码头的集卡预约调度提供了决策依据。

此外,集卡车队为配合码头的预约集港工作,需要改变原有的集卡调配方式和工作时间表,从而会带来额外的成本,由于此类成本难以定量计算,本文所构建的预约优化模型中未将其考虑在内。但是该成本的大小将会影响集卡车队对预约集港模式的接受程度,因此有必要未来进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘义苍,孙小明. 集装箱堆场吊车装卸作业排序问题的研究[J]. 工业工程与管理, 2005, 5: 72-78.
- [2] Vacca I, Bierlaire M, Salani M. Optimization at container terminals: status, trends and perspectives[C] // Proc. of Swiss Transport Research Conference, Ascona, Switzerland, 2007.
- [3] Morais P, Lord E. Terminal appointment system study[R]. Ottawa: Transport Canada, 2006.
- [4] Giuliano G, O'Brien T. Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007, 12(7): 460-473.
- [5] 吴达,冉祥辰. 集装箱预约集港的探索与实践[J]. 港口经济, 2012 (3): 5-9.
- [6] Mani A, Fischer M J. FHWA Operations Support-Port Peak Pricing Program Evaluation[R]. Washington: Federal Highway Administration, 2009.
- [7] Sharif O, Huynh N, Vidal J M. Application of El Farol model for managing marine terminal gate congestion[J]. Research in Transportation Economics, 2011, 32(1): 81-89.
- [8] Chen G, Govindan K, Yang Z. Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 141(1): 179-188.
- [9] 魏航. 集装箱码头堆场取箱时间窗优化研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14(9): 21-36.
- [10] Huynh N, Walton C M. Robust scheduling of truck arrivals at marine container terminals [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(8): 347-353.
- [11] Namboothiri R, Ereira A L. Planning local container drayage operations given a port access appointment system [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(2): 185-202.
- [12] Kim K H, Kim H B. The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(9): 821-835.
- [13] Guan C, Liu R R. Container terminal gate appointment system optimization[J]. Maritime Economics & Logistics, 2009, 11 (4): 378-398.
- [14] Chen X, Zhou X, List G F. Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2011, 47(6): 965-982.
- [15] Zhang X, Zeng, Q, Chen W. Optimization Model For Truck Appointment In Container Terminals [J]. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013) Procedia -Social and Behavioral Sciences, 2013, 96(6): 1938-1947.
- [16] Chen G, Govindan K, Golias M M. Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: Proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern[J]. Transportation Research Part E, 2013, 55 (6): 3-22.
- [17] 许巧莉,孙丽君,胡祥培,等. 非平稳到达的码头集卡预约优化模型[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(5): 589-596.
- [18] 曾庆成,张笑菊,张倩. 内外集卡协同服务的码头集卡预约优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 115-122.
- [19] Phan M, Kim K H. Collaborative truck scheduling and appointments for trucking companies and container terminals [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 86: 37-50.
- [20] Ji X, Zhang J, Ran B, et al. Fluid Approximation of Point-queue Model[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 138: 470-481.
- [21] Wang W P, Tipper D, Banerjee S. A simple approximation for modeling nonstationary queues[C] // INFOCOM'96. Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies, San Francisco, USA, 1996, 1: 255-262.
- [22] 杨超,陆志强. 基于遗传算法的出口集装箱送箱时间窗优化[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(6): 1643-1646.
- [23] Dimitri B, Robert G. Data Networks [M]. London: Prentice Hall, 1992.