

# 集装箱码头集卡拥堵收费模型与算法

曾庆成\*, 陈文浩, 黄玲

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 研究集装箱码头集卡拥堵收费问题,目的是减少集卡排队等待时间,以及由集卡排队引起的污染排放.为确定最优的拥堵费率,建立了集卡拥堵收费的双层规划模型.模型考虑了码头运营商、集卡司机和政府管理者之间的博弈关系.在上层模型中,码头运营商以总排队费用最低为目标;下层是用户均衡模型,集卡司机以广义费用最低为目标选择到达时段,通过上下层模型间的反馈决定最优的拥堵收费方案.为求解模型,设计基于文化基因启发式(MH)算法和逐点固定流体近似(PSFFA)算法的求解方法,利用MH算法搜索最优收费方案,利用PSFFA算法计算排队时间.最后,应用算例对模型和算法的有效性进行验证.结果表明,拥堵收费可以有效地减少集卡排队时间,所设计的模型考虑了集卡收费的影响因素,以及码头运营商和集卡司机等主体之间的利益关系,为缓解码头集卡拥堵提供了一种有效的方法.

**关键词:** 集装箱码头;拥堵收费;闸口管理;双层规划

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201501011

## 0 引言

随着集装箱运输的发展,集装箱港口吞吐量快速增长.大量的集卡在高峰时期到达港口,导致集装箱码头闸口集卡排队现象增加,这一方面降低了港口集疏运效率和集卡车队运营效益,另一方面容易造成港区甚至所在城市的交通拥堵,加剧港区环境污染.如何减少集卡排队成为集装箱码头、集卡车队和管理部门关心的热点问题.

为减少码头集卡拥堵,国内外一些港口实施了集卡预约、拥堵收费和时间窗设置等管理集卡到达的方法.其中,拥堵收费被认为是解决集装箱码头集卡拥堵的有效方法之一.

拥堵收费研究在理论和实践上都具有十分重要的意义,是经济学和交通工程学领域的热点问题之一.拥堵收费最早被用于治理城市道路拥堵问题,在伦敦、新加坡等城市得到较好的应用.国内外学者针对拥堵收费问题开展了大量的研究,构建了拥堵收费模型.已有的拥堵收费模型分为两种:一种是以Walters<sup>[1]</sup>为代表的静态收费方法,此方法以边际成本定价模型为基础,考查经典

的一般道路最优拥堵定价理论,以社会效益的最大化为目标构建拥堵定价模型;另一种是以Vickrey<sup>[2]</sup>为代表的动态收费方法,即在高峰期内对出行者进行动态收费,假设一定时刻的收费水平等于不收费平衡下该时刻出行者的等待时间费用,构建拥堵定价模型.由于动态收费在实践上比较困难,Lindsey等<sup>[3]</sup>提出了多阶段拥堵收费(step tolling)的方法,目的是在接近动态收费的同时,提高可操作性.

另一方面,拥堵收费社会福利的问题也受到关注,典型研究如Harrington等<sup>[4]</sup>研究拥堵收费公众支持的问题,结果表明,除管理部门和一部分时间价值高的出行者外,大部分的出行者会从拥堵收费中遭受利益损失,并认为拥堵收费系统成功的关键在于争取公众的支持和理解.为研究拥堵收费中管理者与司机相互制约、相互影响的关系,一些学者使用双层规划模型来求解拥堵收费定价问题,如陈来荣等<sup>[5]</sup>、黄亚飞等<sup>[6]</sup>、刘南等<sup>[7]</sup>的研究.

近年来,拥堵收费逐渐被应用于管理港口集

卡到达,如洛杉矶、长滩、新加坡等港口<sup>[8-9]</sup>.一些学者对集卡拥堵收费的效果进行了研究,如 Yuen 等<sup>[9]</sup>、彭传圣等<sup>[10]</sup>通过对洛杉矶港、长滩港的研究,认为拥堵收费能够有效减少码头集卡排队. Chen 等<sup>[11]</sup>建立了集卡收费优化模型,首先以集卡排队最小为目标获得每个时段最优的集卡到达量,然后以总收费最小为目标,以满足第一阶段获得的集卡到达量为约束,优化每个时段的收费标准.

已有的道路拥堵收费的研究可以为集卡拥堵收费问题提供一定的借鉴,如拥堵收费的定价模型、社会福利分析、收费策略等.但是,由于系统参与者行为特征、收费目的,以及收费方法等均有较大不同,需要与之适应的模型与方法.同时,在集卡拥堵收费中,如何考虑各方利益均衡进行拥堵收费定价,如何有效刻画收费情况下码头集卡到达与排队行为,如何设计有效的求解方法等有待进一步研究.

针对上述问题,本文建立集卡拥堵收费双层规划模型,其中上层为拥堵收费优化模型,下层为用户均衡模型,通过上下层模型间的反馈决定最优的集装箱码头拥堵收费方案.为了求解模型,设计基于文化基因启发式算法和逐点固定流体近似算法的求解方法.

## 1 集卡拥堵收费双层规划模型

### 1.1 问题描述与变量定义

集卡拥堵收费是指在考虑集卡进港时段选择行为的基础上,通过向高峰时段到达集卡收取一定的费用,达到减少排队时间、缓解码头拥堵的目的.为此,码头经营者需要确定合理的拥堵收费方案,科学评价拥堵收费的效果.为提高拥堵收费的科学性,不仅需要考虑到码头闸口能力的大小、集卡到达规律,以及闸口服务时间不确定性的影响,还要考虑拥堵收费对集卡进港时段选择行为的影响.

为此,采用双层规划模型刻画各利益主体间的关系(如图1所示).上层模型表示码头运营商的决策行为,决策变量是各时段的收费水平;下层模型表示集卡司机针对上层模型决策做出的最优选择,即集卡司机以广义费用最低为目标,选择到港时段.决策过程中,上下层的决策与选择行为相互影响,即:首先,由上层模型获得初始的拥堵收费方案;然后,下层模型中基于集卡司机选择确定

集卡到达序列,利用排队论模型计算集卡排队时间,从而得到上层模型的目标函数值,进而对上层模型中的拥堵收费系数进行调整.通过上下层模型间的反馈获得最优的拥堵收费方案.

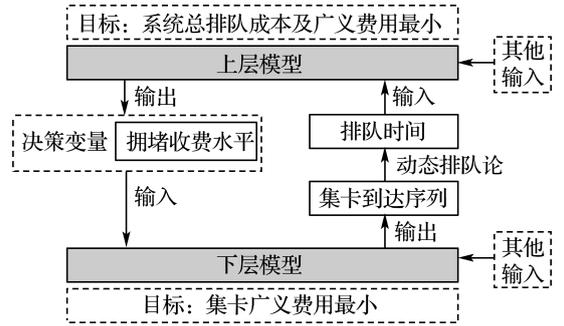


图1 集卡拥堵收费双层规划模型

Fig.1 Bi-level programming model for truck congestion toll

为构建模型,定义参数与变量如下.  
模型参数

$T$ :决策时段的集合;

$N$ :集卡到达总量;

$n_t$ : $t$ 时段到达的集卡数量, $t \in T$ ;

$w_t$ : $t$ 时段的排队时间, $t \in T$ ;

$c$ :集卡的平均单位排队成本;

$c_t^r$ :计划 $r$ 时段到达(即无收费时)的集卡选择在 $t$ 时段到达的集卡广义费用, $t \in T, r \in T$ ;

$f_t^r$ :计划 $r$ 时段到达的集卡选择在 $t$ 时段到达的集卡到达量, $t \in T, r \in T$ ;

$\lambda_t$ : $t$ 时段集卡到达率, $t \in T$ ;

$C_t$ : $t$ 时段闸口服务台数量, $t \in T$ ;

$\rho_t$ : $t$ 时段闸口利用率, $t \in T$ ;

$v_t$ : $t$ 时段闸口服务效率, $t \in T$ ;

$u_{\max}$ :用户承担拥堵费能力的上限;

$u_{\min}$ :拥堵收费交易费用.

决策变量

$u_t$ : $t$ 时段拥堵收费, $t \in T$ .

### 1.2 模型构建

#### (1)上层模型

如果不考虑拥堵收费对集卡到达总量的影响,上层模型目标函为系统总排队成本以及广义费用最小.

$$\min Z = \omega_1 c \sum_{t=0}^T n_t w_t + \omega_2 \sum_{t=0}^T \sum_{r=0}^T f_t^r c_t^r \quad (1)$$

约束条件:

$$(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_T) = f^{\text{PSFFA}}(n_1, n_2, \dots, n_T) \quad (2)$$

$$u_{\min} \leq u_t \leq u_{\max} \quad (3)$$

式中： $\omega_1 + \omega_2 = 1, \omega_1 > 0, \omega_2 > 0$ 。式(2)是 PSFFA 动态排队时间计算公式，式(3)表示拥堵收费不高于用户承担能力的上限，不低于拥堵收费交易费用。 $u_t$  需要先设定一个初始值，然后根据下层模型的计算结果进行调整。 $n_t, f_t^r, c_t^r$  需要由下层模型求出。

### (2) 下层模型

对任何由上层模型给出的拥堵收费方案，下层模型中有唯一的平衡到达情况与之对应。下层模型为集卡选择到达时段模型，其目标函数为集卡广义费用最小。

$$\min Z_1 = \sum_{t=0}^T \sum_{r=0}^T \int_0^{f_t^r} c_t^r(x) dx \quad (4)$$

约束条件：

$$\sum_{r=0}^T f_t^r = q_r; r \in T \quad (5)$$

$$f_t^r \geq 0; t, r \in T \quad (6)$$

$$n_t = \sum_{r=0}^T f_t^r; t, r \in T \quad (7)$$

$$c_t^r = \alpha_1 \omega_t + \alpha_2 (t - r) + \alpha_3 u_t; t \in T, r \in T \quad (8)$$

$$\alpha_i > 0; i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

式(5)~(7)表示集卡到达量平衡约束，其中  $q_r$  表示无收费时在  $r$  时刻到达闸口的集卡数量。式(8)表示集卡司机广义成本构成，集卡司机选择某时段的广义成本取决于三方面因素：到达时段的排队时间，到达时段与原计划时段的偏移，以及到达时段的收费  $u_t$ 。

$u_t$  根据不同的收费策略和收费方法可以有不同的表示。目前，拥堵收费的方法可以分为动态收费方法和静态收费方法。动态拥堵收费根据拥堵状况实时调整收费费率，即

$$u_t = f(\omega_t) \quad (10)$$

本文采用静态收费方法，设定收费时段和不收费时段，对每个收费时段收取不同水平的费用，收费时段设置的时间长度越小，收费效果就越接近动态收费。其分时段收费函数如下：

$$u_t = \begin{cases} 0; & t \in \text{不收费的时段} \\ u_i; & t \in \text{收费的时段} \end{cases} \quad (11)$$

## 2 算法设计

该模型属于 NP-hard 问题，为了求解模型，

设计基于文化基因启发式 (memetic heuristic, MH) 算法和逐点固定流体近似 (PSFFA) 算法的求解方法，利用文化基因启发式算法搜索最优收费方案，利用逐点固定流体近似算法计算集卡排队时间。

### 2.1 文化基因启发式算法

在遗传算法中，通过随机变异得到一个可提高整个种群性能的个体是非常困难的，导致算法收敛速度较慢。因此，本文采用模拟文化进化过程的文化基因启发式算法。与遗传算法相比，文化基因启发式算法可以在局部搜索过程中进行优化，提高算法收敛速度。

这里设计算法的主要思路是：首先，通过随机方法生成初始种群，进行遗传操作生成子代，并对生成的子代进行禁忌搜索；对更新后的种群进行选择操作，将种群中适应度值高的个体保留下来并抛弃余下个体；然后重复这个过程，直到满足停止条件。其主要框架如图 2 所示。

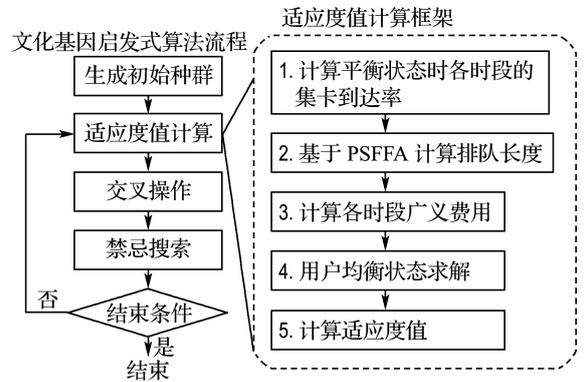


图 2 文化基因启发式算法框架

Fig. 2 Framework of memetic heuristic algorithm

#### (1) 文化基因与初始种群

每个个体由  $K$  个文化基因 (meme) 构成，每个文化基因  $meme(t)$  表示第  $t$  个时段的拥堵费  $I_t$ 。初始种群中的个体数为  $N$ ，每个个体的文化基因首先由一个 0-1 变量决定是否收费，若收费则用标准分布  $U(1, u_{\max})$  产生拥堵收费的大小， $u_{\max}$  表示最大的拥堵费水平。

#### (2) 交叉操作

文化基因搜索过程模仿自然进化过程，从父代中生成新的子代。在父代中随机选择两个父本，设定一个交叉参数  $\Phi$ ，对应每个文化基因产生一个 0 至 1.0 的随机数，如果随机数小于  $\Phi$ ，则将两

个父本对应的文化基因进行交叉操作. 图 3 描述了交叉操作的过程, 第 2 位和最后一位的文化基因进行交叉, 其余部分保持不变.

个位置记入禁忌列表, 在下次生成相邻个体的过程中, 被记入禁忌列表中的文化基因位不能被改变, 若没有发生改变则不更新禁忌列表.

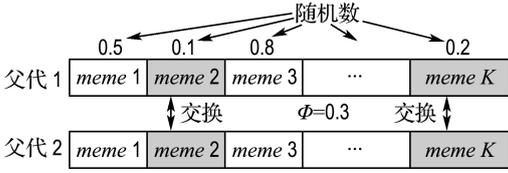


图 3 交叉操作

Fig. 3 Crossover operation

(3) 禁忌搜索

在交叉操作之后采用禁忌搜索提高子代的适应度值. 在这个过程中, 子代的个体被允许通过相邻个体改进自身的文化基因, 相邻个体通过改变个体的某个文化基因得到. 图 4 说明了相邻个体的生成方法, 其中第 3 位由 6.4 变成 3.5, 新的值通过随机变量产生.

2.2 计算排队时间的 PSFFA 算法

在图 2 的算法流程中, 需要通过计算排队时间获得适应度值. 由于集卡到达具有随时间变化的非稳态特征<sup>[11]</sup>, 传统的稳态排队模型虽然可以得到集卡排队的平均情况, 但是无法计算非稳态特征的排队情况. 仿真软件虽然可以计算非稳态的排队时间, 但是计算速度较慢. 因此, 本文设计了基于逐点固定流体近似 (PSFFA) 算法<sup>[12]</sup>的方法计算排队时间, 其基本思想是将每个时段分为若干个更小的时间段, 在每个时间段上应用静态排队理论计算排队长度, 并且所有时间段的排队长度都服从流守恒 (图 5).

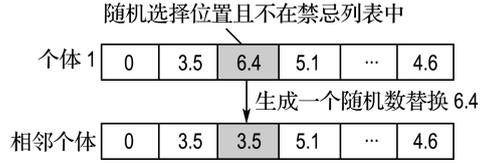


图 4 相邻个体的生成方法

Fig. 4 Generation method of adjacent individual

在禁忌搜索过程中, 每个个体均产生相邻个体, 若相邻个体的适应度比原有个体的要高, 则使用相邻个体替代 (进化) 原有个体. 选择适应度最大的个体, 记为梯度个体 (gradient solution), 然后比较梯度个体文化基因发生改变的位置, 将这

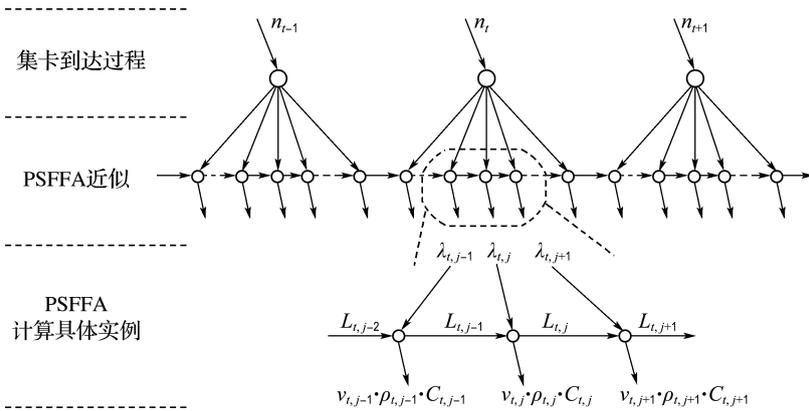


图 5 PSFFA 计算过程

Fig. 5 Calculation process of PSFFA

时段  $t$  的排队长度为  $L_t$ , 集卡到达率为  $\lambda_t$ . 为了计算动态排队长度, 将  $t$  时段分为  $J$  个时间点, 则  $t$  时段  $j$  时间点的集卡到达率为  $\lambda_{t,j} = \lambda_t, \mu_{t,j} = C_{t,j} v_{t,j} \rho_{t,j}$ , 排队长度为  $L_{t,j}$ , 排队时间为  $w_{t,j}$ . 根据流守恒原理, 有

$$L_{t,j} = L_{t,j-1} + \lambda_{t,j} - C_{t,j} v_{t,j} G^{-1}(L_{t,j}) \quad (13)$$

$$L_t = \sum_{j=1}^J L_{t,j} / J \quad (14)$$

$$w_{t,j} = L_{t,j} / \mu_{t,j} \quad (15)$$

其中  $\rho_{t,j} = G^{-1}(L_{t,j})$ , 是经典排队模型队长函数的反函数, 可由二分法逼近求解, 步骤如下:

$$L_0 = 0 \quad (12)$$

步骤 1 已知队长  $L_{t,j}$ , 令  $\bar{\rho}_{t,j} = 1, \rho_{t,j} = 0$ ;

步骤 2 令  $\hat{\rho}_{t,j} = (\bar{\rho}_{t,j} + \rho_{t,j})/2$ , 则  $\hat{L}_{t,j} = G^{-1}(\hat{\rho}_{t,j})$ ;

步骤 3 若  $\hat{L}_{t,j} > L_{t,j}$ , 则  $\bar{\rho}_{t,j} = \hat{\rho}_{t,j}$ ; 若  $\hat{L}_{t,j} < L_{t,j}$ , 则  $\rho_{t,j} = \hat{\rho}_{t,j}$ ;

步骤 4 重复步骤 2 和步骤 3, 若满足  $|\hat{L}_{t,j} - L_{t,j}| < 0.1$  或迭代次数达到预先设定的最大迭代次数, 则算法结束,  $\rho_{t,j} = \hat{\rho}_{t,j}$ .

### 3 算例分析

#### 3.1 算例选择与参数标定

以天津港某集装箱码头集卡到达数据为例, 进行算例分析. 经过统计分析, 该码头集卡到达时间间隔服从负指数分布, 闸口服务时间服从 4 阶爱尔朗分布, 闸口服务规则为先到先服务. 于是, 队长计算公式为

$$L = G(\rho) = \frac{(\rho C)^{C+1}}{C!(1-\rho)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{C-1} \frac{(\rho C)^n}{n!} + \frac{(\rho C)^C}{C!(1-\rho)} \right\}^{-1} \cdot \left\{ \frac{1+k}{2k} + \frac{(k-1)(1-\rho)(C-1)\sqrt{4+5C}-2}{32k\rho C} \right\} \quad (16)$$

其中服务台个数  $C$  为 10, 爱尔朗分布系数  $k$

$= 4, \rho$  表示系统利用率. PSFFA 算法中的时间点个数  $J$  设为 10. 其他参数为最大平均拥堵收费水平设为 30,  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ .

#### 3.2 PSFFA 算法的验证

为了验证 PSFFA 算法的可靠性, 使用该码头连续 12 d 闸口数据进行仿真(采用的仿真软件为 Arena), 将仿真得到的结果(这里视为实际排队时间)与基于 PSFFA 算法计算的结果比较(如图 6 所示). 结果表明: PSFFA 算法计算得到的排队时间与实际排队时间的相关系数较大 ( $R^2 = 0.895$ ), 可以说明 PSFFA 算法的有效性.

图 6 结果表明, 现状集卡平均排队时间为 14.6 min, 最大排队时间为 46.9 min. 码头集卡到达高峰集中在每天的 10 时、15 时、22 时, 容易出现排队拥堵. 在某些时段会出现集卡到达量较小, 闸口利用率不高的现象.

#### 3.3 拥堵收费优化结果

以上述实际数据为基础, 采用蒙特卡罗仿真法, 设定 3 种不同的场景, 分别用  $S_1, S_2, S_3$  表示每天总的集卡到达量处于高中低 3 种水平. 每个场景均随机产生 7 个算例, 每个算例的时段数  $T$  为 24,  $N$  通过随机数产生并服从  $U(m_1, m_2)$ , 如表 1 所示.

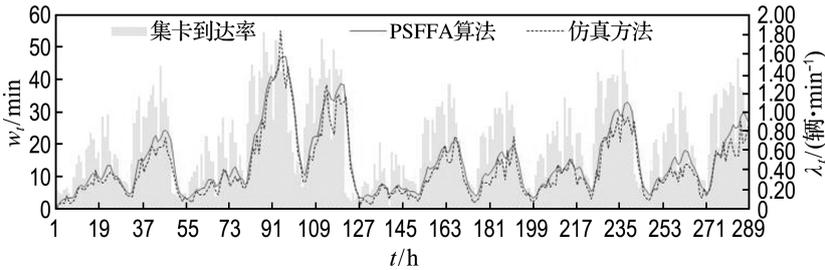


图 6 PSFFA 算法与仿真方法计算结果比较

Fig. 6 Comparison of the calculation results between PSFFA algorithm and simulation method

表 1 情景设定

Tab. 1 Scenarios setting

情景	$m_1$	$m_2$
$S_1$	100	800
$S_2$	801	1 400
$S_3$	1 401	2 000

采用文化基因启发式算法求解拥堵收费, 初始种群个体数为 200, 交叉参数  $\Phi = 0.3$ , 禁忌列

表长度  $L_n = 56$ , 算法最大迭代次数为 500, 计算结果如图 7~9 所示.

图 7 至图 9 分别说明了不同集卡到达量下的最优拥堵收费定价. 当码头集卡到达量处于较低水平时(情景  $S_1$ ), 优化结果是高峰所处的时段征收拥堵收费, 且拥堵收费的定价较低. 由于集卡到达量较小, 排队并不明显, 通过征收拥堵费改变高峰排队时间的效果不明显; 当码头天作业量处于

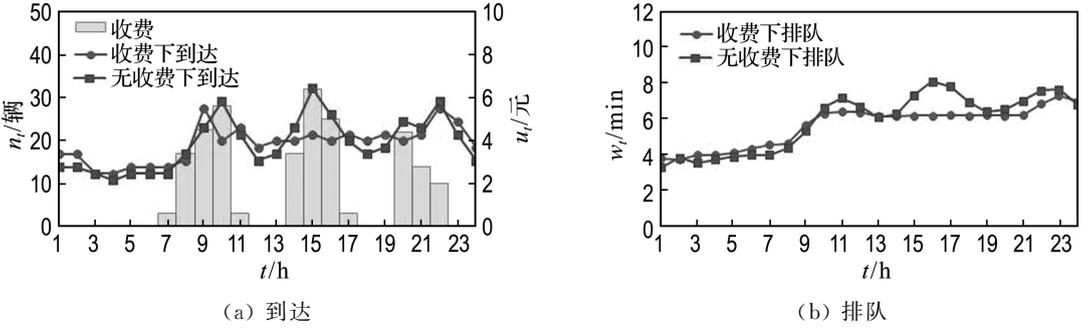


图7 情景 S<sub>1</sub> 的计算结果

Fig. 7 Calculation results of scenario S<sub>1</sub>

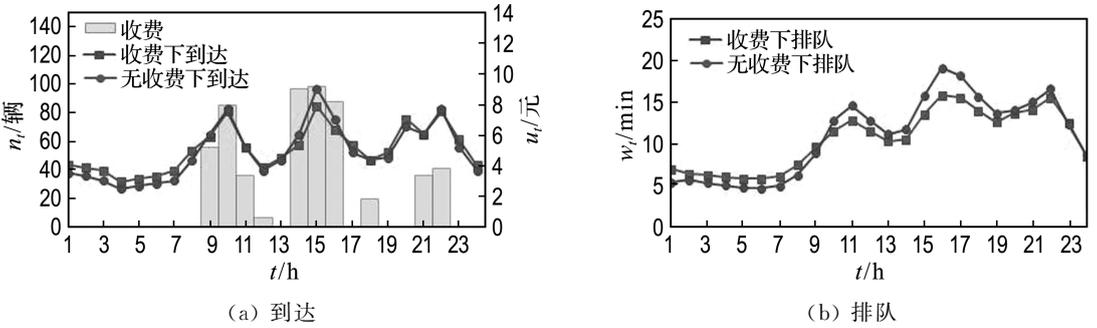


图8 情景 S<sub>2</sub> 的计算结果

Fig. 8 Calculation results of scenario S<sub>2</sub>

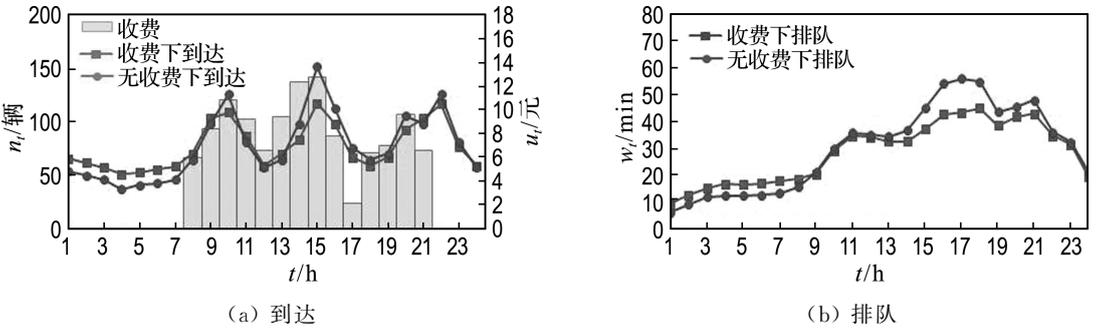


图9 情景 S<sub>3</sub> 的计算结果

Fig. 9 Calculation results of scenario S<sub>3</sub>

中等水平时(情景 S<sub>2</sub>),需要对高峰时段征收更多的拥堵费,高峰时段排队时间的降低明显;当码头天作业量处于较高水平时(情景 S<sub>3</sub>),不仅需要对高峰时段征收拥堵费,在临近高峰的其他时段也征收拥堵费,以促使集卡到达向其他时段转移.

### 3.4 敏感度分析

由于在优化模型中考虑了集卡司机广义费用,模型优化的结果征收的拥堵费通常不会太多.如果不考虑集卡司机广义费用的多少,从码头管理者的角度出发,需要知道征收拥堵费的多少对降低排队时间效果的影响.这里将上层模型改为

$$\min Z = \omega_1 \sum_{t=0}^T n_t w_t + \omega_2 \sum_{t=0}^T \sum_{r=0}^T f_t^r c_t^r \quad (17)$$

约束条件:

$$(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_T) = f^{\text{PSFFA}}(n_1, n_2, \dots, n_T) \quad (18)$$

$$u_{\min} \leq u_t \leq u_{\max} \quad (19)$$

$$\frac{\sum_{t=0}^T \sum_{r=0}^T f_t^r c_t^r}{\sum_{t=0}^T \sum_{r=0}^T f_t^r} \leq k; k > 0 \quad (20)$$

其中,式(20)表示的是拥堵收费强度,采用情

景  $S_3$  进行计算, 结果如表 2 所示。结果表明, 随着拥堵收费强度的增加, 平均排队时间降低。当收费强度非常大时, 各时段的集卡到达趋于平衡, 这时的排队时间为最小的 12.86 min。

表 2 拥堵收费强度敏感度分析

Tab. 2 Sensitivity analysis of congestion charging intensity

$k$	收费后排队时间/min	收费前排队时间/min	改变量
1	26.85	26.9	0.05
5	26.64	26.9	0.26
10	23.76	26.9	3.14
15	21.53	26.9	5.37
1 000	12.86	26.9	14.04

## 4 结 论

(1) 针对集卡到达随时间变化的特性, 建立非平稳排队模型, 基于 PSFFA 算法计算集卡排队时间。此方法可以有效描述集卡到达特征, 为集装箱码头管理集卡到达(包括集卡预约与拥堵收费)提供依据。

(2) 构建集卡拥堵收费模型, 此模型综合考虑了集卡司机与集装箱码头运营商之间的利益关系, 确定每个时段最优的拥堵收费额度, 可以为集卡拥堵收费决策提供依据, 有助于深化拥堵收费理论与方法。

(3) 实际应用方面, 针对我国集装箱码头数据开展算例分析, 可以为我国集装箱码头拥堵收费的实施提供依据。

本文构建的模型中, 假设集卡司机的广义费用与排队时间、拥堵收费等因素有关。事实上, 运输任务有轻重缓急, 其排队时间的影响程度不同, 而且由于工作习惯原因, 不同时段到达对集卡司机的影响也不同。因此, 综合考虑影响集卡到达时段选择的因素, 提高广义费用函数的科学性以及拥堵收费模型的有效性, 是值得进一步深入研究的问题。其次, 由于集卡拥堵收费需要综合考虑码头运营商、集卡车队与司机、政府管理部门, 以及社会公众等诸多主体间的利益关系, 而且拥堵收费可能带来新的问题, 科学的评估方法是促进其实践应用的重要手段, 也是值得深入研究的问题。再次, 本文模型现实应用的难点在于公众对集卡

拥堵收费的支持和政策保障。因此, 研究如何将拥堵收费的收入以各种形式返还给社会, 提高拥堵收费的公众认可度是值得关注的问题。最后, 集卡拥堵收费不应该独立实施, 而应该与其他交通需求管理方法配套协调使用, 构成集装箱码头交通需求管理的综合方法。本文未来的研究方向还包括研究集成集卡拥堵收费和排队超长放行两项措施的方法, 在闸口排队超过一定长度时, 采取部分或全部车辆免费放行的措施, 以减少高峰时段的排队长度。

## 参考文献:

- [1] Walters A A. The theory and measurement of private and social cost of highway congestion [J]. *Econometrica*, 1961, **29**:676-699.
- [2] Vickrey W S. Congestion theory and transport investment [J]. *The American Economic Review*, 1969, **59**(2):251-260.
- [3] Lindsey R C, van den Berg V A C, Verhoef E T. Step tolling with bottleneck queuing congestion [J]. *Journal of Urban Economics*, 2012, **72**(1):46-59.
- [4] Harrington W, Krupnick A J, Alberini A. Overcoming public aversion to congestion pricing [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, **35**(2):87-105.
- [5] 陈来荣, 张 岚. 基于双层规划的拥挤定价模型及算法[J]. 北京工业大学学报, 2006, **32**(6):526-529.  
CHEN Lai-rong, ZHANG Lan. Congestion pricing model and algorithm based on bilevel programming model [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, **32**(6):526-529. (in Chinese)
- [6] 黄亚飞, 刘 涛. 路网最优费率的双层规划模型及算法[J]. 交通运输工程学报, 2006, **6**(4):105-111.  
HUANG Ya-fei, LIU Tao. Bi-level programming model and algorithm of optimal toll rate for highway network [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, **6**(4):105-111. (in Chinese)
- [7] 刘 南, 陈达强, 陈鸣飞. 城市道路系统多时段、多出行方式拥挤定价模型[J]. 管理工程学报, 2007, **21**(2):89-94.  
LIU Nan, CHEN Da-qi, CHEN Ming-fei.

- Congestion pricing models with multiple time periods and travel modes for urban road systems [J]. **Journal of Industrial Engineering and Engineering Management**, 2007, **21**(2):89-94. (in Chinese)
- [8] Holguín-Veras J. Evaluation study of port authority of New York and New Jersey's time of day pricing initiative [D]. New Brunswick:Rutgers University, 2005.
- [9] Yuen A, Basso L J, Zhang A. Effects of gateway congestion pricing on optimal road pricing and hinterland [J]. **Journal of Transport Economics and Policy**, 2008, **42**(3):495-526.
- [10] 彭传圣,张立丽. 美国集装箱港口拥堵原因及其缓解措施[J]. 水运科学研究, 2007(3):18-20.
- PENG Chuan-sheng, ZHANG Li-li. The congestion and alleviation methods for America container ports [J]. **Research on Waterborne Transportation**, 2007(3):18-20. (in Chinese)
- [11] CHEN Xiao-ming, ZHOU Xue-song, List G F. Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports [J]. **Transportation Research Part E**, 2011, **47**(6):965-982.
- [12] Green L, Kolesar P. The pointwise stationary approximation for queues with nonstationary arrivals [J]. **Management Science**, 1991, **37**(1):84-97.

## A model and its algorithms for truck congestion toll at container terminals

ZENG Qing-cheng\*, CHEN Wen-hao, HUANG Ling

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The issue of modeling truck congestion toll at container terminals is addressed to decrease the truck queuing and ease related air pollution. A bi-level programming model is developed to determine the optimal congestion toll rates. In the model, the game relationship of terminals operators, truckers and government regulators is considered. The upper level model is to minimize the total cost caused by truck queuing for terminals operators. And the lower level is user equilibrium model, in which each truck driver determines its arrival time to minimize the generalized cost. According to the feedback between upper-level and lower-level model, the optimal congestion toll strategy is determined. To solve the problem of this model, a method based on memetic heuristic (MH) algorithm and pointwise stationary fluid flow approximation (PSFFA) algorithm is designed. MH algorithm is used to search the optimal toll rates and PSFFA algorithm is applied to calculation of the truck queuing time. Finally, numerical experiments are provided to illustrate the validity of the model and algorithm. Calculation results indicate that congestion toll can decrease truck's queuing time effectively. The developed congestion toll model considers the toll influencing factors, and the benefit relationship of truckers and terminal operators. It provides an efficient method to alleviate the truck congestion.

**Key words:** container terminals; congestion toll; gate management; bi-level programming