

# 分布式决策下的集装箱码头泊位分配研究

张 恒<sup>1</sup>, 全雄文<sup>1</sup>, 徐 亚<sup>2</sup>, 陈增强<sup>1</sup>

(1.南开大学 计算机与控制工程学院, 天津 300350; 2.南开大学 商学院, 天津 300071)

**[摘 要]**为减少船舶废气排放和优化集装箱码头资源配置,建立了分布式决策环境下的泊位和岸桥联合调度模型,将船舶和码头看作相互独立的决策主体,船舶优化航速及抵港时刻,码头则优化自身泊位及岸桥分配。采用多回合组合拍卖方法,将泊位服务时段看作特殊商品,港航双方就泊位分配反复协商达成一致,相比于以码头作为集中决策者的集中式决策方案更易于被船舶方接受。数值实验表明,分布式决策模型求得的分配方案相比于传统固定抵港时间策略能够有效减少船舶燃油消耗及在港等待时间,降低船舶废气排放。

**[关键词]**水路运输;泊位分配;组合拍卖;集装箱码头;分布式决策

**[中图分类号]**U656.1+35;N945.12

**[文献标识码]**A

**[文章编号]**1005-152X(2018)02-0034-07

## Study on Berth Distribution of Container Terminals under Distributed Decision-making

Zhang Heng<sup>1</sup>, Quan Xiongwen<sup>1</sup>, Xu Ya<sup>2</sup>, Chen Zengqiang<sup>1</sup>

(1. School of Computer & Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300350;

2. Business School, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** In this paper, in order to cut the emissions of the vessels and optimize the resource allocation of the container terminals, we built a berth-quay joint scheduling model under the distributed decision-making environment which treated the vessels and terminals as mutually independent decision-making bodies and optimized the navigating speed and arrival time of the former and the berth and quay resources allocation of the latter. Then using multi-round combinatorial auctioning, we regarded the service hour of the berths as a unique commodity and the vessel owner and terminal operator would negotiate until an agreement was reached concerning the allocation of the berths, which as compared with the decision-making process centered around the terminal operator, is more easily acceptable to the vessel owner. Next by a numerical test, it was shown that compared with the traditional fixed arrival time strategy, the distributed decision-making model could effectively reduce the fuel consumption and waiting time of the vessels in the quay as well as their emissions.

**Keywords:** waterway transport; berth allocation; combinatorial auctioning; container terminal; distributed decision-making

## 1 引言

近年来,船舶废气排放问题受到社会广泛关注,这些废气将对港区环境和居民健康产生不利影响。以香港为例,2013 年水上运输仍是该市最大的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 排放源,排放贡献率分别达到了 50%、31%、36%、42%,在所有船舶中,远洋集装箱船是最大排放源<sup>[1]</sup>。航运减排措施可分为三类:技术手

段、运营手段和市场手段<sup>[2]</sup>。目前的研究和实践多集中于技术手段,而对后两者的研究还不多。泊位是港口的稀缺资源,泊位分配不仅影响码头自身的运营效率,还影响船期可靠性,因此,泊位分配是港航双方通过协作来推进节能减排的重要契合点。对此, Golias 等<sup>[3]</sup>采用可变抵港时间(Variable Arrival Time, VAT)策略,将船舶抵港时间视为决策变量,间接考虑了船舶在港期间的废气排放。Lang 和 Veen-

**[收稿日期]**2018-01-08

**[基金项目]**国家自然科学基金(61573199, 61403213, 71202161);高等学校博士学科点专项科研基金(20120031110036)

**[作者简介]**张恒(1989-),男,湖北当阳人,南开大学计算机与控制工程学院博士研究生,主要研究方向:物流优化与供应链管理;全雄文(1979-),通讯作者,男,南开大学计算机与控制工程学院讲师;徐亚(1981-),男,南开大学商学院讲师;陈增强(1964-),男,南开大学计算机与控制工程学院自动化与智能科学系教授,博士生导师。

stra等<sup>[4]</sup>建立了港航合作下的泊位分配模型,使得燃油成本、机会损失和延误惩罚之和最小化。Du等<sup>[5]</sup>采用更加精确的燃油消耗函数,对燃油消耗量和主要废气排放量做了定量分析。这些研究表明,相比于固定抵港时间(Constant Arrival Time, CAT)策略,通过优化抵港时间可以降低船舶燃油消耗与废气排放。

但是,这些研究都是以码头作为集中决策者来制定泊位分配方案,其存在两方面的问题:首先,大多数船舶出于商业竞争考虑并不愿意将私有信息传递给码头<sup>[6]</sup>,如燃油消耗信息;其次,集中式VAT策略要求船舶依照码头所指定的航速航行,忽略了船舶方的自主性,降低了船舶参与合作的积极性,不利于策略的推广实践。

为克服以上两点不足,本文将码头和船舶看作相互独立的决策主体,在分布式决策环境下研究泊位和岸桥联合调度问题。由于每个主体在决策时都从自身利益出发,经常存在相互冲突的情况,所以需要协调以得到可行方案。组合拍卖作为一种有效的市场机制,可以保护好主体的独立性和私有信息<sup>[7]</sup>,被广泛应用于资源分配问题,如机场跑道分配<sup>[8]</sup>、分布式火车调度<sup>[9]</sup>等。针对问题的特点,本文设计了基于多回合组合拍卖的泊位分配机制,船舶无需在每一回合中对所有可能时段组合进行估值,减轻了船舶方的计算负担,包括投标决策、中标决策、价格更新、拍卖流程四个方面的设计。这样更有利于VAT策略应用于实践,丰富节能减排运营手段和市场手段的研究。

## 2 问题描述

在分布式决策环境下,船舶自主决策航速及抵港时间,码头优化泊位及岸桥分配。船舶决策时主要考虑船期可靠性和航次成本,其中航次成本除去固定成本外主要包括燃油费及港口费用,因此,可将港口费用作为中间量用于双方协商。本文将泊位使

用时段(Time Slot)看作一种特殊商品<sup>[10]</sup>,码头作为资源主体向各船拍卖使用时段并制定中标决策,船舶则竞拍所需时段并支付相应费用(即港口费用)。同时,码头可根据投标情况及时调整时段价格,从而引导船舶避开高峰期。考虑到使用时段的互补性,即船舶需获得一段连续的使用时段,本文采用多回合组合拍卖的方法,双方通过协商达成一致意见。希望通过港航间的这种协商机制来降低船舶燃油消耗和废气排放,提高码头服务水平。

为便于建模,基于以下假设进行研究:

- (1)泊位为同质离散泊位,且物理条件满足任一来港船舶停泊要求;
- (2)船舶一旦开始装卸作业,不允许中断;
- (3)船舶在投标时采用最佳近似投标策略<sup>[11]</sup>;
- (4)不考虑船舶对泊位位置的偏好及岸桥移动约束限制。

## 3 模型建立

### 3.1 数学符号

对本文中出现的数学符号定义如下:

$H$ —计划期长度;

$T$ —泊位使用时段集合,  $T = \{1, 2, \dots, H\}$ ;

$V$ —船舶集合,共  $n$  艘船,  $V = \{1, 2, \dots, n\}$ ;

$B$ —泊位集合,共  $m$  个泊位,  $B = \{1, 2, \dots, m\}$ ;

$l_i$ —初始时刻,船  $i$  距离码头的距离,  $i \in V$ , 单位:海里;

$a_i^0$ —船  $i$  预计抵港时刻,  $i \in V$ ;

$d_i$ —船  $i$  要求最晚离港时刻,  $i \in V$ ;

$h_i$ —船  $i$  装卸作业量,  $i \in V$ , 单位:岸桥工时;

$p$ —燃油价格,单位:美元/t;

$Q$ —码头可用岸桥总数;

$r_i^{\min}, r_i^{\max}$ —每时段至少和最多为船  $i$  分配的岸桥数,  $i \in V$ ;

$q_i$ —码头每时段为船  $i$  预计分配的岸桥数,

$q_i = (r_i^{\min} + r_i^{\max})/2, i \in V$ ;

$v_i^0$ —船*i*计划服务航速,  $i \in V$ , 单位: 节;

$v_i^{\min}, v_i^{\max}$ —船*i*最小和最大航速,  $i \in V$ , 单位: 节;

$\underline{a}_i, \bar{a}_i$ —依离港距离和航速范围计算出的船*i*最早和最晚抵港时刻,  $i \in V$ ;

$A_i$ —船*i*可能抵港时刻的集合,  $i \in V$ ,  $A_i = \{\underline{a}_i, \underline{a}_i + 1, \dots, \bar{a}_i - 1, \bar{a}_i\}$ ;

$F_i^{a_i}$ —船*i*以时刻 $a_i$ 抵港时对应的燃油消耗量,  $i \in V$ ,  $a_i \in A_i$ , 单位: t;

$\lambda_{it}$ —对船*i*, 第*t*时段的价格,  $i \in V$ ,  $t \in T$ , 单位: 美元;

$C_i$ —船*i*港口费用预算,  $i \in V$ , 单位: 美元;

$M$ —足够大的正数。

### 3.2 投标决策

基于最佳近似投标策略, 船舶在每回合竞拍时选择使自身成本最小的时段组合进行投标。在计算燃油成本时, 采用的单位时间燃油消耗函数<sup>[5]</sup>为:

$$r_F = c^0 + c^1 \cdot v^\mu \quad (1)$$

其中,  $c^0, c^1$  为回归系数,  $v$  为航速。考虑到燃油消耗函数非线性带来的求解困难, 本文采用离散化方法进行处理, 计算出不同抵港时刻对应的燃油消耗量。

$$F_i^{a_i} = c_i^0 \cdot a_i + c_i^1 \cdot l_i^{\mu_i} \cdot a_i^{1-\mu_i} \quad \forall i \in V, a_i \in A_i \quad (2)$$

对船*i*,  $i \in V$ , 其投标决策模型如下:

决策变量:

$y_i$ —船*i*靠泊时刻;

$z_{it}$ —0-1变量, 若占用*t*时段则取1, 否则取0,  $t \in T$ ;

$U_i^{a_i}$ —0-1变量, 若以时刻 $a_i$ 抵港则取1, 否则取0,  $a_i \in A_i$ 。

辅助决策变量:

$e_i$ —船*i*离港时刻;

$$\min f(i) = \frac{p \sum_{a_i \in A_i} F_i^{a_i} \cdot U_i^{a_i} + \sum_{t \in T} \lambda_{it} \cdot z_{it}}{N_{i1}} + \frac{(e_i - d_i)^+}{N_{i2}} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{a_i \in A_i} U_i^{a_i} = 1 \quad (4)$$

$$y_i \geq \sum_{a_i \in A_i} a_i \cdot U_i^{a_i} \quad (5)$$

$$e_i \geq y_i + h_i / q_i \quad (6)$$

$$e_i - y_i = \sum_{t \in T} z_{it} \quad (7)$$

$$(t+1)z_{it} \leq e_i \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$y_i \leq t \cdot z_{it} + M(1 - z_{it}) \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} \lambda_{it} \cdot z_{it} \leq C_i \quad (10)$$

$$U_i^{a_i} \in \{0, 1\} \quad \forall a_i \in A_i \quad (11)$$

$$z_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T \quad (12)$$

其中, 目标函数为最小化航行成本(燃油成本和港口费用)与离港延误时间加权和,  $N_{i1}$  和  $N_{i2}$  为标准因子, 用于消除量纲影响,  $(e_i - d_i)^+ = \max\{e_i - d_i, 0\}$ ; 式(4)表示需选择一个抵港时刻; 式(5)表示靠泊时刻不得早于抵港时刻; 式(6)表示装卸作业完成后才能离港, 依预计分配岸桥数来计算; 式(7)定义了所需时段的数目; 式(8)和(9)要求所占时段是连续的; 式(10)表示所支付港口费用不能超过预算。

求解模型后, 船*i*将 $\langle i, y_i, h_i, s_i, b_i, w_i \rangle$ 发给码头进行投标, 其中,  $y_i$  为最早靠泊时刻;  $h_i$  为装卸作业量;  $s_i = \max\{e_i, d_i\}$  为该标要求最晚装卸完工时间;  $b_i = \sum_{t \in T} \lambda_{it} \cdot z_{it}$  表示船舶支付的费用;  $w_i$  为状态变量, 若  $e_i \leq d_i$  则取1, 否则取-1。

### 3.3 中标决策

码头得到本回合所有投标后, 通过求解竞胜标模型来确定中标船舶及分配方案。码头可通过调整岸桥分配来影响船舶实际装卸作业时间, 可看作一个加工时间可控的调度问题<sup>[12]</sup>。

决策变量:

$\theta_i$ —0-1变量, 若船*i*中标则取1, 否则取0,  $i \in V$ ;

$x_{ij}$ —0-1变量, 若船*i*停靠泊位*j*则取1, 否则取0,  $i \in V, j \in B$ ;

$R_{it}$ —在*t*时段为船*i*分配的岸桥数,  $i \in V$ ,

$t \in T$ ;

$\sigma_{i'}$ —0-1变量,等于1时表示船  $i'$  在船  $i$  离开后才靠泊,  $i, i' \in V, i \neq i'$ ;

$\bar{y}_i$ —由码头决策的船  $i$  实际靠泊时刻,  $i \in V$ 。

辅助决策变量:

$r_{it}$ —0-1变量,在  $t$  时段,若安排岸桥为船  $i$  服务则取1,否则取0,  $i \in V, t \in T$ ;

$\bar{e}_i$ —由码头决策的船  $i$  实际离港时刻,  $i \in V$ 。

$$\max f^{\text{port}} = \sum_{i \in V} b_i \cdot \theta_i + \sum_{i \in V} w_i (\bar{e}_i - s_i \cdot \theta_i) \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in B} x_{ij} = \theta_i \quad \forall i \in V \quad (14)$$

$$r_{it} \leq \theta_i \quad \forall i \in V, t \in T \quad (15)$$

$$x_{ij} + x_{i'j} - \sigma_{i'it} - \sigma_{i'it'} \leq 1 \quad \forall i, i' \in V, i \neq i', j \in B \quad (16)$$

$$\sum_{i \in V} R_{it} \leq Q \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$r_{it}^{\min} r_{it} \leq R_{it} \leq r_{it}^{\max} r_{it} \quad \forall i \in V, t \in T \quad (18)$$

$$t \cdot r_{it} \geq \bar{y}_i + M(r_{it} - 1) \quad \forall i \in V, t \in T \quad (19)$$

$$t \cdot r_{it} \leq \bar{e}_i - 1 + M(1 - r_{it}) \quad \forall i \in V, t \in T \quad (20)$$

$$\bar{e}_i - \bar{y}_i = \sum_{t \in T} r_{it} \quad \forall i \in V \quad (21)$$

$$\sum_{t \in T} R_{it} \geq h_i \cdot \theta_i \quad \forall i \in V \quad (22)$$

$$y_i \cdot \theta_i \leq \bar{y}_i \leq s_i \cdot \theta_i \quad \forall i \in V \quad (23)$$

$$y_i \cdot \theta_i \leq \bar{e}_i \leq s_i \cdot \theta_i \quad \forall i \in V \quad (24)$$

$$\bar{e}_i \leq \bar{y}_{i'} + M(1 - \sigma_{i'it}) \quad \forall i, i' \in V, i \neq i' \quad (25)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V, j \in B \quad (26)$$

$$r_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V, t \in T \quad (27)$$

$$\sigma_{i'it} \in \{0, 1\} \quad \forall i, i' \in V, i \neq i' \quad (28)$$

$$\theta_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \quad (29)$$

其中,目标函数第一项表示最大化港口收益,第二项是为了优化船舶离港时刻,对中标船舶  $i$ ,若  $w_i = 1$ ,则可使  $\bar{e}_i$  尽量接近  $s_i$ ,若  $w_i = -1$ ,则表示若在  $s_i$  离港将产生延误,因此需尽量早点离港;式(14)—式(15)表示仅对中标船舶分配泊位及岸桥;式(16)表示安排在同一泊位的船舶不应有时间冲突;式(17)表示分配的岸桥数不能超过码头所拥有的岸桥数;式(18)表示每时段为船舶分配的岸桥数限制;式

(19)—式(21)表示装卸作业不能中断;式(22)表示需完成中标船舶的装卸作业;式(23)—式(24)表示实际靠泊和离港时刻应在船舶所投标的时段区间内;式(25)表示当  $\sigma_{i'it} = 1$  时,  $\bar{e}_i \leq \bar{y}_{i'}$  成立。

### 3.4 价格更新机制

为促使船舶投标时段分布更加均匀,减少冲突现象发生,码头采用基于拉格朗日松弛算法的价格更新机制<sup>[13]</sup>来引导船舶投标,具体如下:

$$\lambda_{it}^{(k+1)} = \max \left\{ \lambda_{it}^0, \lambda_{it}^{(k)} + s^k \gamma_t \right\} \quad \forall i \in V, t \in T \quad (30)$$

其中,  $\lambda_{it}^{(k+1)}$  为第  $k+1$  回合船  $i$  第  $t$  时段的价格,  $\lambda_{it}^0$  为拍卖开始时船  $i$  每时段的保留价格,  $\gamma_t = \sum_{i \in V} z_{it} - 1$  为时段  $t$  能力约束的次梯度,  $s^k$  为步长。

$$s^k = \alpha \left( \frac{UB - LB}{\sum_{t \in T} \gamma_t^2} \right) \quad (31)$$

其中,  $\alpha$  是一个常数,  $UB$  和  $LB$  分别为第  $k$  回合码头目标函数的上下界。

### 3.5 拍卖机制设计

拍卖机制步骤如下:

Step 1:初始化。码头向将在计划期内抵港船舶公布时段初始价格  $\lambda^0 = [\lambda_1^0 \ \cdots \ \lambda_n^0]$ ,由于码头通常会根据船舶大小不同安排不同数量岸桥进行装卸作业,所以初始价格采取了差异化定价方式,并置回合计算器  $k=0$ 。

Step 2:投标决策。在回合  $k$ ,每艘船先判断自己在上一回合是否中标,如果中标,则无需投标;否则,根据当前时段价格求解投标模型再次投标。

Step 3:码头决策。码头收集当前回合所有投标,结合上一回合的中标结果,求解竞胜标模型,得到本回合临时分配结果,若所有船舶均中标则拍卖结束;否则,转Step 4。

Step 4:价格更新。依照式(30)更新时段价格,置  $k=k+1$ ,转Step2。

### 3.6 CAT策略模型

本文以传统CAT策略为对照组,码头计划人员



将抵港时间看作一个常量,以最小化离港延误时间之和为目标制定集中式分配方案。

$$\min f^{CAT} = \sum_{i \in V} (e_i - d_i)^+ \quad (32)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in B} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (33)$$

$$y_i \geq a_i^0 \quad \forall i \in V \quad (34)$$

$$\sum_{i \in T} R_{it} \geq h_i \quad \forall i \in V \quad (35)$$

约束条件同式(16)–式(21),式(25)–式(28)

## 4 数值实验

为分析分布式决策模型(Decentralized Decision-making Model, DDM)性能,进行数值实验。以 72h 为计划期,单位时间为 1h,码头共有 4 个泊位和 12 台岸桥,船舶分为 Feeder、Medium、Jumbo 三种类型,比例为 4:5:1。按船舶数目不同,设计了 5 个测试问题。对每个测试问题,按如下方式随机生成 15 个实例:(1)基本参数按表 1 所给区间均匀分布产生;(2)船舶其它参数,  $a_i^0 \sim U[1, 60]$ ,  $l_i = a_i^0 v_i^0$ ,  $d_i = a_i^0 + h_i/q_i \cdot U[1, 1.5]$ , 最小航速取经济航速  $v_i^{\min} = [c_i^0/(c_i^1(\mu_i - 1))]^{1/\mu_i}$ , 最大航速分别为  $v_i^{\max} = 24, 26, 28$ ,  $\underline{a}_i = l_i/v_i^{\max}$ ,  $\bar{a}_i = l_i/v_i^{\min}$ ; (3)价格参数,  $C_i = \lambda_i^0 h_i/q_i \cdot U[1.5, 3]$ ,  $p = 400$ , 对于  $\lambda_i^0$ , 主要考虑装卸费用,假设每台岸桥装卸效率  $\eta = 30$  TEU/h,集装箱装卸费  $c = 60$  USD/TEU,对于这三种船舶,每时段预计分配岸桥数  $q_i = 1.5, 3, 5$ , 所以相应  $\lambda_i^0 = 2\,700, 5\,400, 9\,000$  USD; (4)其它参数,  $N_{it} = pF_i^{a_i^0} + c\eta h_i$ ,  $N_{i2} = 1$ ,  $\alpha = 2$ 。

表 1 船舶基本参数

类型	$h_i$ #1	$r_i$ #1	$c_i^0$ #2	$c_i^1$ #2	$v_i^0$ #3	$\mu_i$ #4
Feeder	[5, 15]	[1, 2]	[406.5, 852.5]	[0.063 19, 0.069 02]	[17, 22]	3.5
Medium	[15, 50]	[2, 4]	[796.9, 1 678.0]	[0.012 46, 0.014 66]	[20, 26]	4
Jumbo	[50, 65]	[4, 6]	[1 677, 3 809]	[0.003 516, 0.004 523]	[24, 26]	4.5

注: #1–文献[14]; #2–根据文献[15]回归分析; #3–文献[16]; #4–文献[5]。

在 MATLAB 环境下采用 YALMIP 建模,调用

CPLEX 12.6 求解,电脑配置为 2.93GHz CPU 和 4 GB 内存。

## 4.1 经济和环境效益分析

为比较 DDM 策略与 CAT 策略在经济和环境效益上的表现,将总等待时间、总离港延误时间、船舶总油耗三项主要指标汇总,见表 2,表中数值为 15 个测试实例的平均值。可见,在 DDM 策略下,(1)经济效益方面,燃油消耗明显下降,可省油 14.0%~16.4%,平均每艘船省油 20.3~26.0t,而且在港等待时间减少 78%以上;(2)环境效益方面,由于燃油消耗的降低及在港等待时间的减少,船舶航行及在港期间的废气排放可以大大减少;(3)延误时间有所增加,这主要是因为分布在分布式决策环境下,船舶参与决策,码头不再作为决策主导者拥有所有信息并以总延误时间最小为唯一目标,另外,设置的港口费用预算约束对此也有一定影响。

表 2 主要性能指标对比

时间单位:h;油耗单位:t

问题	CAT 策略			DDM 策略		
	等待时间	延误时间	油耗	等待时间	延误时间	油耗(节省比例)
12	4.6	0	2 032.6	1.0	0	1 721.0 (15.3%)
14	8.2	0	2 178.5	1.7	0.3	1 821.8 (16.4%)
16	15.3	0.8	2 394.7	2.0	3.7	2 046.4 (14.5%)
18	15.9	0	2 595.0	1.1	0.4	2 229.7 (14.1%)
20	19.9	1.0	3 010.0	3.1	3.8	2 587.2 (14.0%)

为进一步分析燃油节省效果,将 DDM 策略与集中式 VAT 策略<sup>[5]</sup>结果对比,如图 1 所示。在集中式 VAT 策略下,码头以总燃油消耗和延误时间加权和最小化为目标制定集中式决策。DDM 策略下的船舶节油量达到集中式 VAT 策略下节油量的 90%左右,因此,DDM 策略的节油效果十分明显。

下面对港航双方收支情况进行分析,如图 2 所示。相比于 CAT 策略,在 DDM 策略下,对船舶而言,一方面燃油费用会有所减少;另一方面由于船舶首次投标时的竞标价约等于 CAT 策略下的港口费用,随着拍卖的进行,港口费用会有所增加,也就意味着码头收益会增长。不过将两者相减,船舶总成本仍

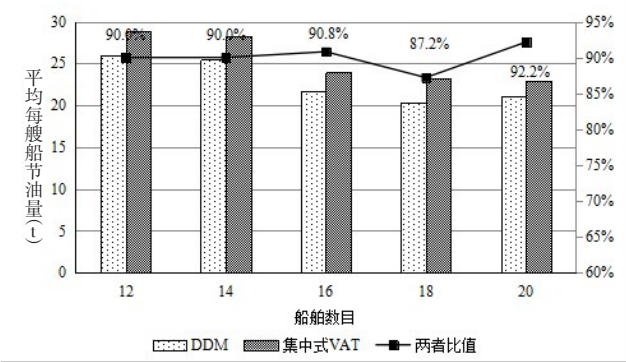


图1 平均每艘船燃油节省量

然降低了3.1%~7.3%。这对实际运营有一定指导意义,首先,通过拍卖方式对时段进行定价,可以更好地反映不同时段的市场价格和供求关系;其次,通过制定合适的初始时段价格可以取得双赢的效果,一方面降低船舶总成本,同时增加码头收益,有利于策略的实行。

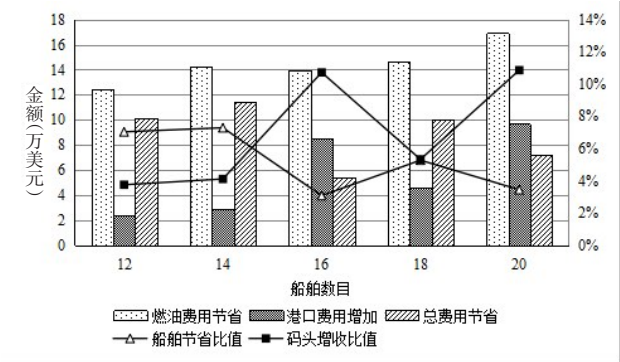


图2 港航双方收支情况

4.2 拍卖效率分析

图3为拍卖所需回合数的统计,码头可通过优化岸桥分配调节船舶实际装卸所需时间,从而优化配置,使得港航双方能够通过较少回合便得到最终分配方案。

需指出的是,仅通过一回合便结束拍卖并不代表首轮投标没有冲突,而是码头通过优化泊位和岸桥分配予以解决。以实例65为例,该例有20艘船,表3为各船首轮投标情况。统计各时段需求次数,如图4所示,即便不考虑岸桥是否充足,仍有多个时段的需求次数大于码头所拥有的泊位数,因而存在冲突。另外,对于船15,通过求解投标模型,得到离港

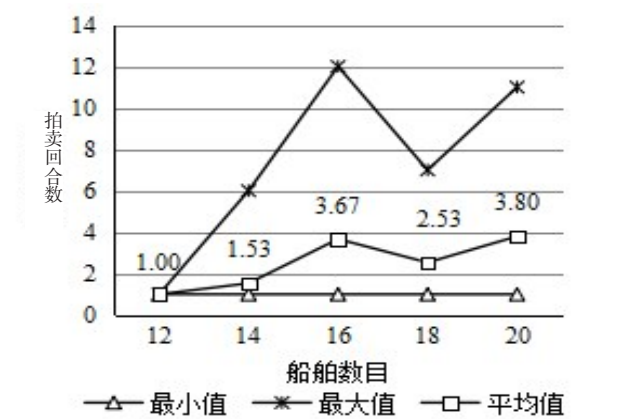


图3 拍卖回合数

时刻为23,投标时却取28,这样做的目的除了给予码头更大的自由度外,更主要的原因是船舶自身希望能够在不延误的情况下晚点离港,从而以更航速航行,进一步节省燃油费用,而不必增加港口费用。

表3 实例65(20\_5)船舶投标情况

船号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$y_i$	29	12	47	9	45	36	42	8	9	23	5	42	10	35	7	11	60	59	47	25
$(e_i)$	42	21	55	16	57	42	51	14	18	32	9	48	23	43	23	17	72	67	56	41
$(d_i)$	42	21	55	16	57	42	51	14	19	32	8	48	25	43	28	17	72	67	56	41
$s_i$	42	21	55	16	57	42	51	14	19	32	9	48	25	43	28	17	72	67	56	41
$w_i$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

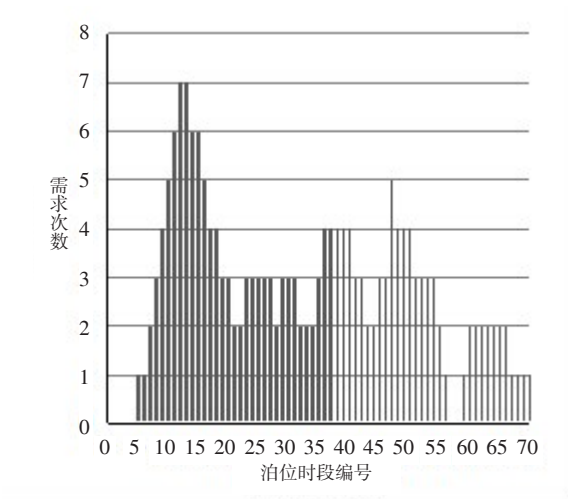


图4 实例65(20\_5)对时段的需求量

通过求解竞胜标模型,该例分配方案如图5所示。由于模型目标函数第二项所起的作用,船15实际靠泊时刻为16,有利于进一步降低油耗;而对于船11,码头则通过分配使其提前离港,避免了产生延

误,这正是船舶所希望得到的。

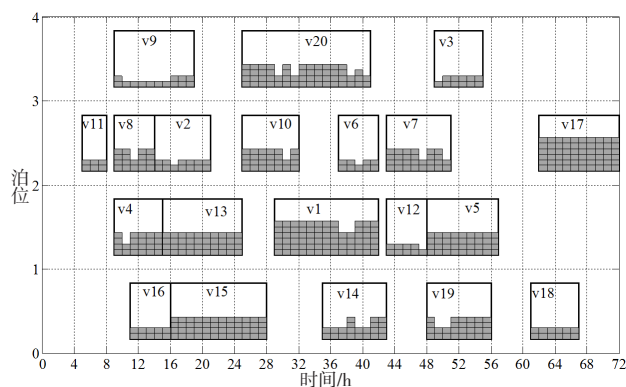


图5 实例65(20\_5)的泊位及岸桥分配方案

## 5 结语

本文研究了分布式决策环境下的集装箱码头泊位和岸桥联合调度问题,将船舶和码头看作相互独立的决策主体,设计了基于多回合组合拍卖的分配机制,这样更有利于VAT策略应用于实践。数值实验表明,相比于CAT策略,DDM策略能够有效降低船舶燃油消耗及在港等待时间,从而降低废气排放。并且,通过拍卖泊位服务时段,在降低船舶运营成本的同时也可以增加码头收入,取得双赢的效果。本文的研究还可进一步深入和完善,第一,对拍卖机制进行改进,研究如何进一步减少离港延误时间;第二,设计相应算法,提高求解速度。

### [参考文献]

- [1]Air Science Group.2013 Hong Kong emission inventory report[R]. Hong Kong:Environment Protection Department,2015.
- [2]Psaraftis H N.Market-based measures for greenhouse gas emissions from ships[J].WMU Journal of Maritime Affairs, 2012,11(2):211-232.
- [3]Golias M M,Saharidis G K,Boile M,et al.The berth allocation problem: optimizing vessel arrival time[J].Maritime Economics & Logistics,2009,11(4):358-377.
- [4]Lang N,Veenstra A.A quantitative analysis of container vessel arrival planning strategies[J].OR Spectrum,2010,32(3):477-

499.

- [5]Du Y,Chen Q,Quan X,et al.Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions[J].Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2011,47(6):1 021-1 037.
- [6]Wang S,Liu Z,Qu X.Collaborative mechanisms for berth allocation[J].Advanced Engineering Informatics,2015,29(3):332-338.
- [7]Ausubel L M,Milgrom P R.Ascending auctions with package bidding[J].Frontiers of Theoretical Economics,2002,1(1):1-45.
- [8]Rassenti S J,Smith V L, Bulfin R L.A combinatorial mechanism for airport time slot allocation[J].The Bell Journal of Economics,1982,13(2):402-417.
- [9]Parkes D C,Ungar L H.An auction-based method for decentralized train scheduling[A].5<sup>th</sup> International Conference on Autonomous Agents[C].2001.
- [10]Strandenes S P.Port pricing structures and ship efficiency[J].Review of Network Economics,2004,3(2):135-144.
- [11]Parkes D C,Ungar L H.Iterative combinatorial auctions:theory and practice[A].17<sup>th</sup> National Conference on Artificial Intelligence[C].2000.
- [12]Shabtay D,Steiner G.A survey of scheduling with controllable processing times[J].Discrete Applied Mathematics,2007, 155(13):1 643-1 666.
- [13]Kutanoglu E,Wu S D.On combinatorial auction and Lagrangian relaxation for distributed resource scheduling[J].IIE Transaction,1999,31(9):813-826.
- [14]Meisel F,Bierwirth C.Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem[J].Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review,2009, 45(1):196-209.
- [15]Notteboom T,Vernimmen B.The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping[J].Journal of Transport Geography,2009,17(5):325-337.
- [16]Du Y,Chen Q,Lam J S L,et al.Modeling the impacts of tides and the virtual arrival policy in berth allocation[J].Transportation Science,2015,49(4):939-956.