

# 连续泊位下泊位分配 与岸桥动态调度的联合优化\*

彭丽姣, 韩晓龙

(上海海事大学物流研究中心, 上海 200135)

**摘要:** 根据到港船舶的装卸作业量、最优靠泊位置, 为了最小化船舶在港时间、提高客户满意度, 对延迟完工的装卸任务量、与最佳靠泊位置的偏离程度设置不同级别的惩罚费用系数; 同时为了充分利用岸桥资源, 考虑岸桥可在船舶间移动装卸的动态调度, 研究连续型泊位下泊位分配-岸桥动态调度的联合优化问题。建立了以最小化延迟完工任务量、偏离最佳靠泊位置和岸桥移动的惩罚费用为目标的整数规划模型, 结果可得到船舶靠泊计划, 以及具体的岸桥分派计划。通过算例验证了联合调度优化模型对提高集装箱码头作业效率和船公司客户满意度的有效性。

**关键词:** 连续泊位; 泊位分配; 岸桥动态调度; 联合调度

中图分类号: U 691.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0083-06

## Coordinated optimization of continuous berth allocation and quay crane dynamic scheduling

PENG Li-jiao, HAN Xiao-long

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** To minimize the total time in harbor and improve customer satisfaction, different levels of punishment for the delay completion tasks and the deviation from the optimal berthing position are considered. To make full use of quay crane resources, dynamic scheduling of quay crane is taken into account and combined with continuous berth allocation simultaneously. An integer programming model is established to minimize the penalty costs of delay completion tasks, deviating from the optimal berthing location and quay crane movement. Berthing schedule and specific quay crane assignment plan can be gained. Experiments are carried out to verify the model, which show that the proposed approach can improve the efficiency of container terminals and the satisfaction of ship companies.

**Key words:** continuous berth; berth allocation; dynamic quay crane scheduling; integrated scheduling

泊位和岸桥是集装箱码头的稀缺资源, 泊位分配和岸桥调度对于提高集装箱码头的运作效率至关重要。泊位分配问题是指为到港船舶安排靠泊位置和靠泊、离港时间, 并最小化船舶在港时间。船舶等待靠泊时间最短、在港装卸作业时间最短、靠泊成本最低以及客户满意度最高为当今

泊位分配问题的主要研究目标。依据实际码头作业时泊位分布方式的不同, 可分为离散型泊位和连续型泊位。根据Imai<sup>[1]</sup>的表述, 离散型泊位是将码头分割成一定数量的部分, 每一部分即为一个泊位, 在每一个时间点每一个泊位上只能停靠一艘船舶。而连续型泊位分布, 码头没有被分割, 在

收稿日期: 2012-09-10

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(71071093); 上海市科委创新项目(11510501900); 上海市自然科学基金项目(10ZR1413300)

作者简介: 彭丽姣(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口优化。

满足船舶长度的情况下船舶可以停靠在码头边界的任意位置上。连续型泊位相对于离散型泊位能更好地利用空间,但连续型泊位分配较复杂。岸桥是集装箱码头重要的装卸资源,岸桥调度所要解决的问题是在给船舶分配好泊位之后,根据到港船舶集装箱的装卸任务量以及船舶离港时间等约束为船舶分配可用的岸桥。岸桥的价格昂贵,如何减少岸桥的闲置时间,提高岸桥的利用率是集装箱码头取得竞争优势的关键。

杨春霞<sup>[2]</sup>提出的泊位-岸桥调度联合优化问题是指码头调度人员根据一定的优化策略及泊位、岸桥是否空闲等约束条件,为一系列到港船舶安排靠泊顺序、靠泊泊位及确定作业岸桥数目的过程。与单纯的泊位分配和岸桥分配相比,泊位-岸桥联合调度把两者当成一个整体,能有效反映其相互影响和相互制约的关系,更符合码头生产组织的实际情况,是目前相关领域研究的热点问题。Li<sup>[3]</sup>和Guan<sup>[4]</sup>将泊位-岸桥分配问题看作一个可同时处理多个任务的处理机调度问题,前者建立了以船舶在港时间最小为目标的模型,提出了启发式求解的静态泊位岸桥配置,后者是以最小化带权重的任务完成时间为优化目标。欧阳玲萍<sup>[5]</sup>以船舶在港时间最短为目标运用蚁群算法求解泊位调度问题,韩骏等<sup>[6-7]</sup>应用免疫遗传算法研究联合调度问题,但两者均是离散型泊位调度,且假设所有为一艘船舶服务的岸桥必须同时结束。同类研究还有

Legato<sup>[8-9]</sup>等。Ak<sup>[10]</sup>引入禁忌搜索法求得最小留港时间以及避免船舶延迟离港的处罚费用, Birger<sup>[11]</sup>考虑了靠泊位置与操作时间并且加入了船舶优先级和滚动时间窗,最小化因船舶停靠位置偏离最佳停靠位的处罚,以及最小化船舶因增加岸桥移动而导致的罚金。乐美龙<sup>[12]</sup>用Memetic算法求解连续型泊位-岸桥分配模型,但集装箱码头制定的泊位分配和岸桥调度计划应以明确的作业任务为导向,需要很强的操作性,以上对泊位-岸桥联合调度的研究模型只能得到特定时间为船舶服务的岸桥数量,无法得出各个岸桥对靠泊船舶的具体分派计划。岸桥的频繁移动会增加过多的岸桥移动成本,且不利于集装箱码头装卸过程的连贯性,而在装卸过程中岸桥在船舶间移动装卸集装箱更能充分利用岸桥资源,如何权衡二者并且得到具体的岸桥分派计划,研究泊位分配和岸桥调度的联合优化是本文的研究目的。

### 1 问题描述

船舶到港后的一系列过程包括船舶到港、分配靠泊位置、分配特定的岸桥、装卸集装箱以及船舶离港。为最小化船舶总在港时间,码头管理者会根据到港船舶相关信息,以及码头装卸的优化策略,将最优的靠泊位置以及可用的岸桥分配给船舶装卸集装箱。图1为泊位与岸桥单独调度的过程,即船舶到港后选择使其等待时间最短的靠泊位置,靠泊后再分配可用的岸桥。

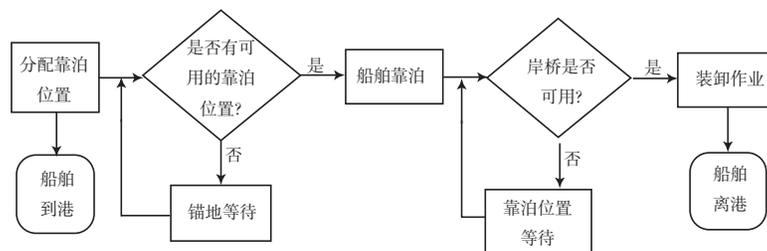


图1 泊位与岸桥单独调度

船舶的在港时间有等待靠泊时间和装卸时间两部分,在装卸过程中,二者存在一定的相互制约,将泊位分配和岸桥调度分开考虑,很可能造成装卸时间增加,后续船舶等待时间增加或某些时段一定的岸桥闲置等问题。本文考虑泊位-岸桥联合调度优化,以船舶总在港时间最短为最

优靠泊位置,不仅考虑了泊位空间的可用性,同时考虑了岸桥对装卸作业时间的影响。引入岸桥在装卸过程中可在船舶间移动装卸的动态调度,克服了单独调度的局限性,有效减少船舶在港时间,并能更好地降低岸桥闲置,提高岸桥装卸利用率。靠泊与装卸过程见图2。

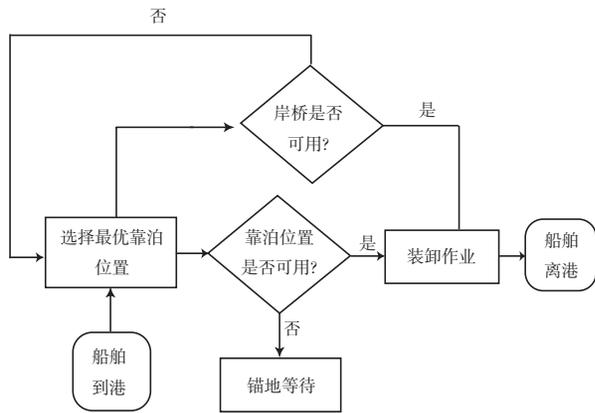
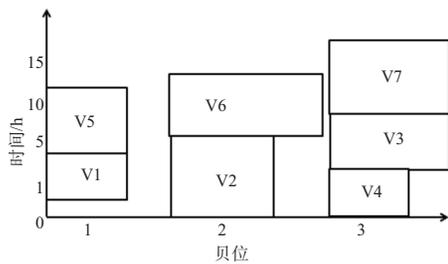
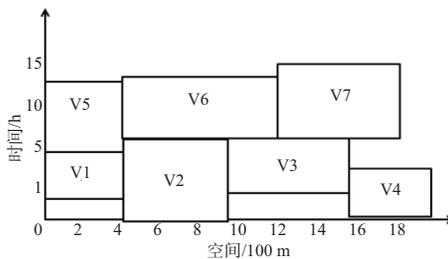


图2 虑泊位-岸桥联合调度优化

为便于理解计算, 时间划分为1 h一个单位的离散化连续时间, 构成以岸线或泊位为横轴、时间为纵轴的二维坐标系。传统的泊位分配是离散的, 将岸线分割成一定数量的泊位, 其泊位分配见图3a)。本文考虑连续型泊位, 将岸线长度划分为100 m为一个单位的离散化连续空间, 为每个船舶找到一个空闲的海岸区域, 并且满足船舶长度, 即可靠泊, 能更有效利用泊位空间, 减少船舶总在港时间, 如图3b)所示, 泊位分配可理解为: 例如, 船舶V1的泊位区间为[0,4], 作业时段为[1,5]。



a) 离散型

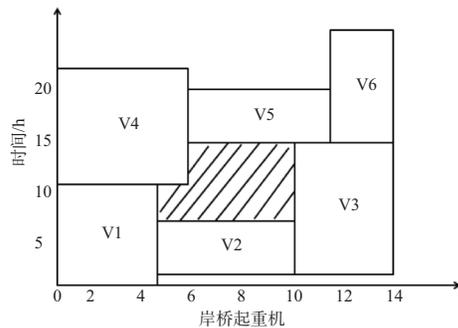


b) 连续型

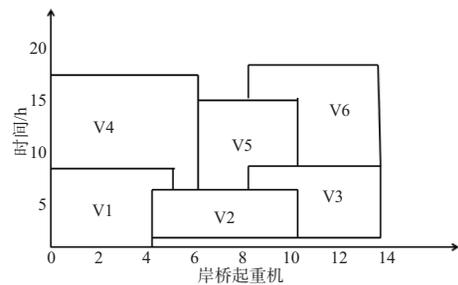
图3 泊位分配

将海岸线上岸桥从岸线0处依次编号为横轴, 船舶在港时间为纵轴, 现阶段对泊位-岸桥联合

调度的研究中, 大多数均假设岸桥一旦为某一船舶装卸集装箱, 将一直为该船舶服务, 直至该船舶离港, 如图4a)所示, 图中阴影部分表明非动态的岸桥调度使岸桥未能充分利用, 岸桥5~10在[8,15]时段内处于闲置的“空隙”期。本文考虑岸桥可根据靠泊船舶的优先装卸级别和集装箱量的多少, 在遵循岸桥不跨越操作以及不超过船舶允许同时作业的最大岸桥数情况下可在船舶间动态调度, 可以很好地克服岸桥的“空隙”期, 其调度结果见图4b), 例如岸桥5~10在[1,6]时段内为船舶2服务。



a) 非动态调度



b) 动态调度

图4 岸桥调度

本文建立的整数规划模型以最小惩罚费用为目标, 该目标分为3部分, 一是延迟完工任务量的惩罚费用, 二是偏离最优靠泊位置的惩罚费用, 三是岸桥过多移动的惩罚费用。目标根据到港船舶不同的集装箱装卸量以及船客户不同等级的优先权, 设置船舶延迟完工装卸任务、偏离最优靠泊位置的惩罚系数, 依据船舶不同等级的惩罚系数, 动态分派岸桥, 综合考虑了船舶的最优靠泊位置、岸桥的充分利用来达到船舶在港时间最短、延迟完工任务量最少, 同时设置岸桥移动惩罚费用, 在满足充分利用岸桥装卸资源的情况下

应尽量减少岸桥移动次数。其优化结果可得到船舶的靠泊时间、靠泊位置、各船舶装卸过程中分配的具体岸桥数量以及确定的各个岸桥对靠泊船舶的具体分派计划，不仅同时解决了集装箱码头岸边装卸作业的两个核心子问题，其结果也更符合实际情况，并能达到优化效果。

## 2 泊位与岸桥协调调度优化模型

### 2.1 建模假设

本文模型的建立基于如下假设：1) 船舶到港时间已知；2) 将岸线看成连续的，岸线需满足靠泊船的长度才可靠泊；3) 根据船舶大小有最大作业岸桥数限制；4) 遵循一次靠泊，且每一船舶都有其最优靠泊位置；5) 船舶的最优状态的在港时间是船舶到港即可靠泊，且分派最大岸桥数，以平均效率对其服务；6) 船舶装卸作业不能中途停止；7) 不考虑船舶吃水深度，不考虑移泊、甩港现象。

### 2.2 建立模型

1) 集合符号定义： $V=\{1,\dots,n\}$ ，为待靠泊的船舶； $Q=\{1,\dots,q\}$ ，为可用的岸桥，从岸线左端(0 m)依次编号； $T=\{0,1,\dots,t\}$ ，为计划期时间，是以1 h为一单位的离散时间； $L=\{0,1,\dots,l\}$ ，为海岸线长度，是以100 m为一单位。

2) 参数符号定义： $Bp_i$ 为船舶*i*的最佳靠泊位置； $VI_i$ 为船舶*i*的长度； $Con_i$ 为船舶*i*需要装卸的集装箱数量； $Mq_i$ 为船舶*i*的最大可同时作业岸桥数量； $Ar_i$ 为船舶*i*到达时间； $mf_i$ 为船舶*i*在最优状态下的最早完成作业时间； $\alpha_i$ 为船舶*i*延迟完工任务的惩罚系数； $\beta_i$ 为船舶*i*偏离最佳靠泊位置的惩罚系数； $P$ 为岸桥的效率； $C$ 为岸桥的移动成本。

3) 决策变量定义： $Wk_{it} \in \{0,1\}$ ，船舶*i*在*t*时刻是否作业，是则为1； $Nq_{it}$ 为*t*时刻为船舶*i*服务的岸桥数量； $Nc_{it}$ 为*t*时刻较*t-1*时刻为船舶服务的岸桥数量的变化； $Dw_{it}$ 为*t*时刻还未装卸的集装箱数量； $Pl_i$ 为船舶*i*的靠泊位置； $Bl_i$ 为*i*船左端距最佳靠泊位置的距离； $Qc_{ikt} \in \{0,1\}$ ，*t*时刻*k*岸桥是否移动至*i*船舶，是则为1； $X_{ij} \in \{0,1\}$ ，船舶*i*停靠在船舶*j*前面为1； $Q_{ikt} \in \{0,1\}$ ，*k*岸桥在*t*时刻为*i*船舶服务则为1。

$$F_{\min} = \sum_i \left[ \alpha_i \sum_{t=mf} Dw_{it} + \beta_i Con_i Bl_i + C(Nc_i - Mq_i) \right] \tag{1}$$

4) 目标函数。

以最小惩罚费用为目标，其中包含3方面因素： $t=mf_i$ 时是*i*船舶到港即可靠泊在最优位置上，并有最大满足岸桥数量为该船舶服务，是最早的离港时间，但实际靠泊情况会有靠泊位置和岸桥数量的影响，会导致离港时间的延迟，故此处以 $\alpha_i$ 表示各船舶待作业任务延迟完工的惩罚系数，船舶延迟离港的惩罚系数越大，则表示该船舶待作业任务拥有较高的操作优先权， $\sum_i \alpha_i \sum_{t=mf_i} Dw_{it}$ 即表示所有延迟作业任务总的惩罚费用；第2个惩罚费用项为对偏离最优靠泊位置的惩罚， $\beta_i$ 表示各船舶靠泊偏离最优位置的惩罚系数，惩罚系数高的拥有较高的靠泊优先权，该系数还与船舶需装卸的任务量有关， $\beta_i Con_i Bl_i$ 即在同等的船公司客户满意度下，有较多需装卸任务的船舶偏离最有靠泊位置，惩罚费用会相应较大；第3项惩罚费用为岸桥移动成本，模型允许岸桥依据靠泊船舶不同级别的集装箱装卸优先权在船舶间动态调度装卸，设置此项惩罚费用可以约束岸桥的频繁移动带来的移动成本， $C(Nc_i - Mq_i)$ 表示岸桥移动的惩罚成本，减去 $Mq_i$ ，这是满足各船舶最早离港的必要移动。

5) 约束条件。

$$\sum_i Q_{ikt} \leq 1; \forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T \tag{2}$$

$$k_1 Q_{jk_1 t} + M(1 - X_{ij}) \geq k_2 Q_{jk_2 t} - M(1 - Q_{jk_1 t})$$

$$\forall i \in V, \forall k_1, k_2 \in Q, \forall t \in T; k_1 \neq k_2 \tag{3}$$

$$Q_{ik+1t} + Q_{ik-1t} - Q_{ikt} \leq 1$$

$$\forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T; k \geq 2 \tag{4}$$

$$Dw_{it} \geq Dw_{i-1t} - Nq_{it-1} P$$

$$\forall i \in V, \forall t \in T; t \geq 1 \tag{5}$$

$$Dw_{i,Arri} = Con_i; Dw_{it} = 0 \quad t \in T, \forall i \in V; t < Ar_i \tag{6}$$

$$Wk_{it} \geq Dw_{it} / Con_i + Wk_{i,t-1}$$

$$\forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T; t \geq 1 \tag{7}$$

$$Dw_{it} \geq Wk_{it}; Dw_{it} \geq Q_{ikt} \quad \forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T \tag{8}$$

$$Nq_{it} \leq Mq_i Wk_{it} \quad \forall i \in V, \forall t \in T \tag{9}$$

$$\sum_k Q_{ikt} = Nq_{it} \quad \forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_i Nq_i \leq N \quad \forall i \in V \quad (11)$$

$$Pl_i - Bp_i \leq Bl_i; Bp_i - Pl_i \leq Bl_i \quad \forall i \in V \quad (12)$$

$$Wk_{it} + Wk_{jt} \leq 1 + X_{ij} + X_{ji} \quad \forall i, j \in V, \forall t \in T; i \neq j \quad (13)$$

$$Pl_i + Vl_i - L(1 - X_{ij}) \leq Pl_j \quad (14)$$

$$Pl_i + Vl_i \leq L \quad \forall i \in V \quad (15)$$

$$Qc_{ikt} \geq Q_{ikt} - Q_{ikt-1}; Qc_{ikt} \geq 0$$

$$\forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T; t \geq 1 \quad (16)$$

$$Nc_i = \sum_k \sum_t Qc_{ikt} \quad \forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T \quad (17)$$

$$Bl_i \geq 0; Pl_i \geq 0; Wk_{it} \in \{0, 1\}; X_{ij} \in \{0, 1\}; Q_{ikt} \in \{0, 1\}$$

$$\forall i, j \in V, \forall k \in Q, \forall t \in T; i \neq j \quad (18)$$

式(2)表示k岸桥在t时刻只能为一艘船舶服务;式(3)~(4)限制岸桥不可跨越操作;式(5)表明了t时刻船舶i还剩余的未作业的需装卸的集装箱量;式(6)说明船舶到港的初始剩余未装卸箱量等于船舶任务量,且船舶到港前剩余装卸量为0;式(7)表示船舶i一旦开始作业,则连续作业直到剩余未装卸量为0;式(8)保证了无岸桥作业下船舶处于非作业状态,剩余任务量为0则无需岸桥作业;式(9)为船舶i服务的岸桥数量都不可超过船舶i可接受的最大岸桥数量,且船舶i不处于作业状态则为0;式(10)计算t时刻同时作业于船舶i的岸桥数量;式(11)为岸桥总数量约束;式(12)为最佳靠泊位置与实际靠泊位置的偏移距离;式(13)是船舶作业与靠泊位置关系,即当船舶i,j同时处于作业状态时,必须有前后靠泊的关系;式(14)保证船舶不重叠靠泊;式(15)表示船舶i靠泊位置不可超过海岸线总长度;式(16)表示t时刻较t-1时刻为船舶i服务的岸桥k是否移动;式(17)为i船舶服务岸桥变化数量;式(18)是变量约束。

### 2.3 算例分析

本算例设置为需要靠港船舶为5艘,码头岸桥数量为13,岸桥的最优效率为30 TEU/(台·h),岸线长度为1 500 m,计划周期为25 h,岸桥的移动成本为20。其他参数设置见表1。

表1 算例已知参数

<i>i</i>	<i>V<sub>i</sub></i>	<i>A<sub>r<sub>i</sub></sub></i>	<i>Con<sub>i</sub></i>	<i>α<sub>i</sub></i>	<i>B<sub>p<sub>i</sub></sub></i>	<i>M<sub>q<sub>i</sub></sub></i>	<i>β<sub>i</sub></i>	<i>m<sub>f<sub>i</sub></sub></i>
V1	300	1	720	3	0	3	0.000 4	9
V2	500	2	1 500	2	500	5	0.000 5	12
V3	300	1	1 800	3	200	5	0.000 1	13
V4	200	3	1 200	1	800	4	0.000 3	13
V5	300	3	900	2	600	3	0.000 2	13

此处的最早到港时刻、开始作业、离港时刻是指离散时间的的时间期末,例如V1的最早开始装卸作业时间即为其到港时刻,是1时刻,则1时末为船V1的开始装卸时刻,在满足最大岸桥数下,在港所需装卸时间是8 h,即9时刻末V1船才完工离港。根据模型引用Gurobi优化软件求解,可得船舶靠泊计划如图5所示,岸桥的动态分派计划如图6所示。

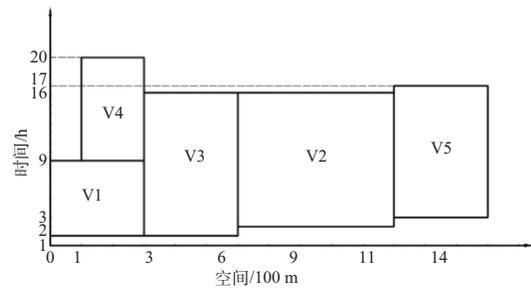


图5 泊位-岸桥联合调度靠泊计划

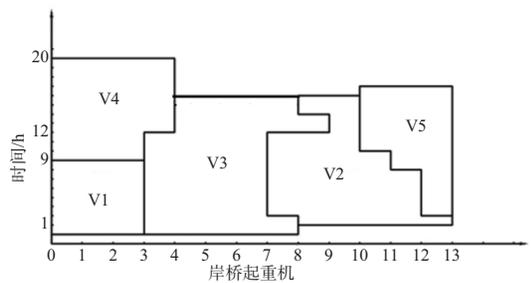


图6 泊位-岸桥联合调度岸桥动态分派计划

求得目标函数的最小优化惩罚费用为7 655,船舶靠泊位置以及目标函数的各个船舶的3部分惩罚费用如表2所示,其中 $Pl(i)$ 为船舶i的实际靠泊位置, $Lf(i)$ 为船舶i的离港时刻, $Dw(i)$ 为船舶i延迟完工任务量的惩罚费用, $Bl(i)$ 为船舶i偏离最优靠泊位置的惩罚费用, $Nc(i)$ 为为船舶i服务的岸桥增加的移动成本。

表2 算例惩罚费用

$i$	$Pl(i)$	$Lf(i)$	$Dw(i)$	$Bl(i)$	$Nc(i)$
V1	0	9	0	0	0
V2	600	16	1 020	75	40
V3	300	16	1 170	18	40
V4	100	17	3 150	252	0
V5	1 100	20	1 800	90	0

由惩罚费用可知,船舶V2, V3, V4, V5均因没有靠泊在最优靠泊位置,分别产生了75,18,252,90的惩罚费用,因受靠泊位置的影响以及同时为船舶作业的岸桥数量,船舶的装卸任务完成时间有所延误,例如船舶V3,在最早离港时间 $mf_3=13$ ,13时末其任务剩余量仍有270,故此时期每多延误1时刻的剩余量均会产生惩罚费用,直至装卸任务完成,船舶V3总延误费用为1 170;且船舶2,3岸桥移动频繁产生了一小部分费用。

模型考虑连续泊位能更充分利用泊位空间资源,岸桥的动态调度很好地克服了岸桥闲置的“空隙”时间,提高集装箱码头的装卸效率,同时在最优靠泊位置的约束下研究泊位-岸桥联合调度优化,可以达到减少船舶总在港时间,且动态岸桥调度可以根据船舶的优先装卸操作权选择优先装卸的船舶服务,从而达到船客户的满意度。

### 3 结论

通过构造连续动态型泊位-岸桥联合调度的整数规划模型,将连续型泊位分配、动态岸桥调度结合更符合现实操作与优化。考虑装卸任务的优先级、最优靠泊位置以及岸桥的动态调度,设置不同船舶的不同级别的惩罚系数,将泊位与岸桥调度协同优化,结果可得到集装箱码头为到港船舶安排具体靠泊位置与靠泊时间,以及每一岸桥在每一时刻对各船舶的调度安排。经算例求证该方法对减少船舶在港时间、岸桥闲置时间,提高集装箱码头作业效率,以及增加客户满意度有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Imai A, Sun X, Nishimura E. Berth allocation in a container port: Using a continuous location space approach[J]. Transportation Research: Part B, 2005, 39(3): 199-221.
- [2] 杨春霞, 王诺. 基于多目标遗传算法的集装箱码头泊位一岸桥分配问题研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1 720-1 722.
- [3] Li C L, Cai X, Lee C Y. Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern[J]. IE Transactions, 1998, 30: 433-445.
- [4] Guan Y, Xiao W Q, Cheung R K, et al. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: Heuristic and worst-case analysis[J]. Operations Research Letters, 2002, 30 (5): 343- 350.
- [5] 欧阳玲萍. 基于蚁群算法的泊位调度问题[J]. 控制工程, 2009, 16: 106-109.
- [6] 韩骏, 孙晓娜, 靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(2): 117-121.
- [7] 靳志宏, 徐奇, 韩骏, 等. 集装箱码头泊位与岸桥联合动态调度[J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(11): 809-814.
- [8] Legato P, Gulli D, Trunfio R. The quay crane deployment problem at a maritime container terminal[C]. Proceedings of the 22th ECMS, 2008: 53-59.
- [9] Cheng J L, You F H, Yang Y. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56: 1 021-1 028.
- [10] Ak A, Erera A L. Simultaneous berth and quay crane scheduling for container ports[R]. USA: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [11] Birger Raa W, Dullaert R, Schaeren V. An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38: 14 136- 14 147.
- [12] 乐美龙, 刘菲. 基于算Memetic算法的泊位和岸桥分配问题[J]. 武汉理工大学学报, 2011-33(11): 66-71.

( 本文编辑 武亚庆 )