

基于复合成本的集装箱码头泊位-岸桥联合调度优化方法

徐皖东^{1,2}, 刘桂云^{1,2*}, 王慈云¹, 骆璐瑶¹

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波港口贸易合作与发展协同创新中心, 浙江 宁波 315832)

摘要: 针对集装箱码头泊位与岸桥调度中的资源和成本问题, 考虑不确定因素的影响, 采用增添缓冲时间方式, 以复合成本最低为目标建立泊位岸桥联合调度优化模型, 设计改进的遗传算法对模型进行求解. 在案例数据分析中, 比较了港口和船公司在不同成本比率下的调度结果, 验证了该方法能在保证客户满意度的同时不损害码头利益, 对港口生产操作决策具有一定参考价值.

关键词: 集装箱码头; 泊位与岸桥; 联合调度; 复合成本; 遗传算法

中图分类号: U691+.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 06-0087-05

港口在全球经贸发展中占有重要地位, 如何降低经营成本, 提高港口综合服务水平一直是港口企业追求的目标. 码头岸线是港口的核心资源, 高效调度和运用码头及其设施设备, 是优化港口服务能力的重要手段. 而同时, 码头资源调度也是港口生产运作中最复杂的问题, 调度方法需要根据环境、资源及客户要求的变化, 持续完善和优化.

在集装箱运输周转过程中, 船公司偏好挂靠于可保证船舶在港时间相对较短的港口来缩短周转时间; 而港口企业不仅要满足船舶的按时作业和准时离港的要求, 还要考虑码头自身的运作成本. 若在集装箱装卸过程中尽可能多地配备岸桥、场桥等大型装卸机械, 使船舶尽早离港, 将会导致泊位利用率降低, 且大型装卸机械的启动成本很高. 因此一味追求服务质量将可能导致运作成本增加, 码头运营者应兼顾两者, 为船舶进行合理的泊位分配, 提高泊位资源利用率, 并制定合理的岸桥分配和调度计划. 通过优化生产调度方法, 做到开源节流, 满足客户服务需求的同时有效控制自身成本.

Imai 等^[1]假设每艘船舶服务岸桥数固定, 研究了船舶动态到达下的以在港时间最小化为目标的泊位-岸桥调度. 靳志宏等^[2]将岸桥分成固定岸桥和调度岸桥两部分, 研究了岸桥的动态分配, 优化

了泊位与岸桥分配以及作业序列. Karam 等^[3]针对泊位和岸桥协同调度提出功能集成的方法, 并验证此方法较大的改善了收敛性. 刘桂云等^[4]从码头运营者角度出发, 基于客户满意度最大的情况下, 以惩罚最小化为优化目标, 求出船舶的靠、离泊规划与最佳作业顺序. Wang 等^[5]设计了VIP客户惩罚成本和公平性的权重向量, 通过模拟退火算法考虑优先级, 实现了双因素邻域搜索策略及快速求解模型. 上述研究更多的是从提升客户满意度的角度出发来考虑泊位-岸桥调度优化问题.

在满足客户需求的同时, 也要注重提高生产效率, 保证码头的经营效益. Meisel 等^[6]针对船舶靠泊位置对岸桥装卸效率的影响以及岸桥的边际效率, 强调了岸桥装卸效率在泊位分配中的重要性. 高超锋等^[7]考虑了并行作业岸桥数量对装卸效率的影响, 并提出在该约束下泊位与岸桥集成分配优化方法. 谭盛强等^[8]建立了多目标泊位-岸桥集成调度一阶段和岸桥移动成本最小化的分配二阶段模型并通过混合算法求解. 杨劼等^[9]在考虑岸桥装卸成本的基础上建立基于非线性混合整数规划的调度优化模型, 采用基于可拓关联函数的改进遗传算法求解. Liu 等^[10]从可持续发展角度出发, 针对泊位和岸桥分布不公问题, 综合考虑最短在港时间、最小系统成本和最小不公平性, 建立了多

收稿日期: 2019-01-21.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省基础公益研究计划 (LGF19G030003).

第一作者: 徐皖东 (1994-), 男, 浙江江山人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 港口物流管理. E-mail: 842003261@qq.com

*通信作者: 刘桂云 (1972-), 女, 辽宁鞍山人, 教授, 主要研究方向: 港口物流管理. E-mail: liuguiyun@nbu.edu.cn

目标联合调度模型.

集装箱码头实际生产调度中存在许多难以预测的不确定因素,使作业计划的稳定性和可行性受到影响,因此研究不确定条件下的泊位和岸桥调度问题更有现实意义.桂小娅^[11]针对不确定条件,以最小化期望总离港时间和总缓冲时间为目标函数,设计出前摄-反应两阶段的调度决策框架.张振毓等^[12]提出前摄调度计划和反应策略相结合的决策框架,以质量鲁棒性和解鲁棒性为目标函数,并将缓冲时间添加到前摄调度计划中.

本文综合考虑船舶在港等待靠泊时间成本、岸桥装卸成本、偏离偏好泊位运输成本、离港延迟惩罚成本以及添加缓冲时间成本5个方面,以船舶在港复合成本最低为目标函数建立泊位与岸桥的联合调度优化模型.同时为避免结果陷入局部最优,采用改进的遗传算法求解模型,并设定不同成本比率,权衡港口和船公司的利益,分析在不同比率下调度方案的合理性.

1 问题描述

泊位-岸桥联合调度要求合理安排靠泊时间和位置以及各岸桥的任务分配与调度,使船舶在港时间和成本都能满足相应的要求.理论上以最小化船舶在港时间为目标优化泊位和岸桥调度,能够提高港口运作效率,增强港口竞争优势.实际上对于港口企业而言,同时也要付出一定的代价,导致码头生产运作成本增加,这应在泊位与岸桥联合调度的优化研究中加以考虑.

码头不确定性环境中,船舶实际到港时间是影响码头前沿调度的主要不确定因素,本文通过提高调度方案的鲁棒性来应对不确定性的干扰.集装箱船舶到港实际时间是以计划时间为均值的均匀分布,即 $a_i = \tilde{A}_i \sim U[A_i - \Delta A_i, A_i + \Delta A_i]$, 其中 ΔA_i 为船舶 i 到港时间的波动范围,标准差 $\theta = \sqrt{(2\Delta A_i)^2 / 12}$. 为降低调度计划的频繁调整和码头成本,设置合理的装卸作业时间缓冲区,即在船舶作业时间外增加一段时间用以吸收不确定性干扰,且缓冲时间的延长将增强调度计划的鲁棒性.因此,根据 ΔA_i 来确定最大缓冲时间值,即 $T_{\max} = \theta$.

本文正是在这样的背景下,对码头前沿生产调度过程中的多方面成本进行分析,并结合缓冲

时间来吸收船舶到达时间随机扰动的影响,采取多目标优化方法,探寻一种既能满足客户满意度,又不损害码头自身利益的优化方案.

问题假设如下: (1)每艘船都有偏好靠泊泊位; (2)船舶移泊不予考虑,每艘船舶都只有一次靠泊机会; (3)所有岸桥分布于同一轨道,不可交叉跨越作业,相邻岸桥之间至少有一个贝位的安全间距; (4)所有岸桥在不受干扰下的装卸效率相等; (5)每艘船舶限定最小与最大的可分配岸桥数; (6)岸桥移动时间及成本不予考虑; (7)岸线泊位的水深可以满足任何船舶靠泊的要求; (8)同一泊位同一时刻只能靠泊一艘船舶; (9)船舶满足先到港再靠泊顺序,靠泊和离港作业时间不予考虑.

2 调度模型

2.1 符号定义

V 为计划周期内到港的船舶总数;
 L 为码头岸线总长;
 Q 为码头可用的岸桥数;
 k 为岸桥号;
 n 为岸桥数;
 A_i 为船舶 i 的计划到港时间;
 a_i 为船舶 i 的实际到港时间;
 b_i 为船舶 i 的期望离港时间;
 l_i 为船舶 i 的长度,包括前后的安全距离;
 c_i 为船舶 i 靠泊位置;
 d_i 为船舶 i 的计划偏好靠泊位置;
 w_i 为船舶 i 的装卸作业量;
 $q_i^{\min}$ 和 $q_i^{\max}$ 分别为船舶 i 允许的最小和最大岸桥数;
 q_{it} 为船舶 i 在 t 时刻分配到的岸桥数目;
 E_i 为船舶 i 的靠泊时间;
 D_i 为船舶 i 的实际离港时间;
 η 为岸桥的单位时间装卸效率;
 v 为集卡运输速度;
 δ_{itk} 表示若 t 时刻岸桥 k 为船舶 i 服务,则取值为 1, 否则为 0;
 β_{im} 表示若船舶 i 在缓冲时间 t 占用 n 座岸桥,则取值为 1, 否则为 0.

2.2 目标函数

基于复合成本的目标函数为:

$$\min F = \sum_i (\alpha_1 w_i (E_i - a_i) + \alpha_2 \sum_t q_{it} + \alpha_3 w_i \cdot |c_i - d_i| / v + \alpha_4 w_i (D_i - b_i) - \alpha_2 |\theta_i|) \quad (1)$$

最小化成本目标函数分为5个部分: 第1项为等待靠泊时间成本, 与船舶装卸箱量和等待时间成正比, α_1 为船舶到港等待靠泊的单位时间成本权重值; 第2项为岸桥装卸成本, 与岸桥作业总工时成正比, α_2 为单个岸桥的单位时间装卸成本权重值; 第3项为偏离偏好泊位的运输成本, 与船舶装卸箱量和集卡运输时间成正比, α_3 为偏离偏好泊位而产生的单位装卸箱量单位时间的运输成本权重值; 第4项为最佳离港延迟惩罚成本, 与船舶装卸箱量和延迟时间成正比, α_4 为超出期望离港时刻的单位时间惩罚成本权重值; 第5项为缓冲时间阶段成本, 与占用岸桥数和缓冲时间成正比, 权重值同取 α_2 。

2.3 约束条件

$$\delta_{itk} + \delta_{i'tk} = 1 \text{ 且 } i \neq i', \quad (2)$$

$$l_i + c_i \leq L, \quad (3)$$

$$q_i^{\min} \leq \delta_{itk} \leq q_i^{\max}, \quad (4)$$

$$E_i \geq a_i, \quad (5)$$

$$q_{it} = \sum_k \delta_{itk}, \quad (6)$$

$$\eta \sum_i \sum_t q_{it} \geq w_i, \quad (7)$$

$$\delta_{itk+1} + \delta_{itk-1} - \delta_{itk} \in \{-1, 0, 1\}, \quad (8)$$

$$1 \leq (E_i \geq D_j) \cup (E_j \geq D_i) \cup (c_i + l_i \leq c_j) \cup (c_j + l_j \leq c_i) \leq 2, \quad (9)$$

$$\sum_k \sum_i \delta_{itk} \leq Q, \quad (10)$$

$$\sum_k \sum_i \delta_{itk} = \sum_t \sum_n \beta_{im} \cdot n, \quad (11)$$

$$\theta_i = \sum_t \sum_n \beta_{im} \cdot t \cdot n, \quad (12)$$

$$\sum_t \sum_n \beta_{im} = 1, \quad (13)$$

$$\delta_{itk}, \beta_{im} \in (0, 1).$$

式(2)表示同一岸桥只有在服务完一条船后才能为其他船服务; 式(3)表示所有船舶靠泊位置不得超过码头岸线范围; 式(4)表示岸桥数目符合最小最大值限制条件; 式(5)表示船舶满足先到港后靠泊的顺序; 式(6)表示某艘船舶某一时刻分配到的岸桥数目; 式(7)表示满足所有船舶作业任务量; 式(8)表示为同一船舶服务的岸桥连续且不跨越; 式(9)表示船舶不存在相同时间与空间上的重叠;

式(10)表示任一时刻的工作岸桥数不超过码头岸桥总数; 式(11)表示缓冲时间段不改变岸桥数量; 式(12)定义缓冲时间段占用的岸桥工时; 式(13)定义决策变量。

3 算法求解

本文采用的改进遗传算法能够自适应调节交叉概率和变异概率, 平衡全局寻优与收敛速度, 达到改进算法性能的目的。当种群适应度陷入局部极值或趋于一致时, 通过增加交叉和变异概率跳出局部最优; 当种群适应度分散时, 通过减少交叉和变异概率保存优良个体。

3.1 染色体编码

采用自然数染色体组编码方式, 优化模型的决策变量, 主要有靠泊位置、作业岸桥数量和缓冲时间。表1中, 船舶1的靠泊位置为 c_1 , 作业岸桥数目为 q_1 , 缓冲时间为 t_1 , 其他船舶类似。

表1 染色体编码

染色体	船舶1	船舶2	船舶3	船舶4	船舶5
染色体1	c_1	c_1	c_1	c_1	c_1
染色体2	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
染色体3	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5

3.2 种群初始化

初始种群采用随机生成方法来保证多样性, 子染色体1、2分别从泊位集合 $[0, L-l_i]$ 、岸桥集合 $[q_i^{\min}, q_i^{\max}]$ 中随机生成, 缓冲时间的染色体虽然是随机生成, 但是船舶有可能提前或者延迟到港, 所以子染色体3从集合 $[-T_i, T_i]$ 中随机生成。

3.3 适应度函数

最简单常用的适应度函数构造方法是目标函数映射法, 这也是求解最小化问题的最实用方法。本文由于目标函数值始终为正, 为了使评价个体更加直观, 采用目标函数作为本文的适应度函数。

3.4 遗传操作

采取锦标赛法对种群个体进行选择。为跳出局部极值找寻全局最优解, 交叉概率 P_c 与变异概率 P_m 在自适应遗传算法基础上进行改进。

$$P_c = \begin{cases} P_{c\min} + \frac{P_{c\max} - P_{c\min}}{f' - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{ave}}, \\ 1 + e^{\frac{f_{\max} - f_{\text{avg}}}{f' - f_{\text{avg}}}}, & f' < f_{\text{ave}}, \end{cases} \quad (14)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m\min} + \frac{P_{m\max} - P_{m\min}}{f - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{ave}}, \\ 1 + e^{\frac{f_{\max} - f_{\text{avg}}}{f - f_{\text{avg}}}}, & f < f_{\text{ave}}, \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{c\min}$ 和 $P_{c\max}$ 分别为交叉概率的下界和上界; $P_{m\min}$ 和 $P_{m\max}$ 分别为变异概率的下界和上界; $f_{\max}$ 为种群的最大适应度; f_{ave} 为种群的适应度平均值; f' 为 2 个交叉个体中较大的适应度值; f 为变异个体的适应度。

3.5 基因修复

经交叉、变异操作之后生成的子代, 会产生一些不符合模型约束条件的染色体, 为了保证每次迭代种群个体的多样性和可行性, 同时防止将其都作为不可行解造成的计算浪费, 需要进行基因修复。主要是依次判断染色体中船舶 i 的靠泊位置是否在 $[0, L - l_i]$ 范围, 分配的岸桥数量是否在 $[q_i^{\min}, q_i^{\max}]$ 范围, 以及缓冲时间是否在 $[-T_i, T_i]$ 范围, 若不符合则在对应基因位进行修复。

4 算例分析

4.1 算例数据

算例依据 M 集装箱码头的生产作业数据设计。该码头岸线总长 1 200 m, 岸桥 13 台, 船舶前后的安全间距设置为船长的 20%, α_1 、 α_4 取 0.3, α_2 取 0.4, α_3 取 0.2。有 7 艘船舶在 24 h 调度期内陆续到港。船舶到港实际时间随机生成, ΔA_i 取 2.5 h, 则到港时间在 $[A_i - 2.5, A_i + 2.5]$ 上服从均匀分布, 标准差计算得 $\theta = \sqrt{(2 \times 2.5)^2 / 12} = 1.44$, 因此最大缓冲时间取 $T_{\max} = 1.44$, 到港船舶基本信息见表 2。

表 2 到港船舶信息

V	l_i	w_i	d_i	A_i	b_i	$q_i^{\min}$	$q_i^{\max}$
1	216	700	0	1	11	2	5
2	162	550	950	3	12	1	4
3	324	1 100	300	5	17	2	5
4	216	900	650	8	22	1	5
5	162	700	950	14	23	1	4
6	240	650	650	9	19	1	5
7	294	1 200	0	11	24	3	5

用 MATLAB 计算, 进行遗传操作时, $P_{c\min}$ 取 0.6, $P_{c\max}$ 取 0.9, $P_{m\min}$ 取 0.001, $P_{m\max}$ 取 0.1, 得到算法进化收敛过程(图 1), 调度优化结果见表 3。

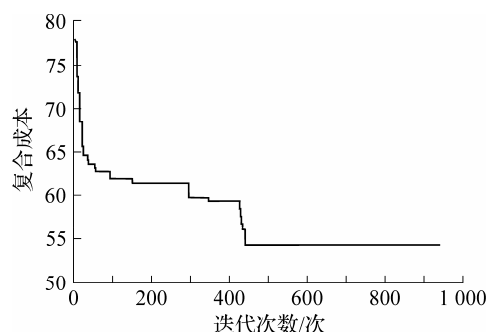


图 1 算法进化收敛图

表 3 调度优化表

V	a_i	E_i	D_i	c_i	$c_i d_i$
1	2.2	2.2	9.9	0	0
2	4.5	4.5	14.4	950	0
3	6.6	6.6	18.2	350	0
4	6.1	6.1	13.2	675	25
5	13.2	14.4	24.5	950	0
6	9.4	13.2	20.9	650	0
7	9.9	9.9	20.3	0	0

4.2 港口与船舶成本分析

改变权重值系数设置各部分成本权重比, 从港口和船公司两方面考虑以获得合理的成本比率。为便于分析, 将岸桥装卸成本、集卡运输成本、缓冲时间成本统一为港口成本, 等待靠泊时间成本、离港延迟惩罚成本统一为船公司成本, 即将 α_2 、 α_3 统一为 C_1 , α_1 、 α_4 统一为 C_2 。设定不同的港口和船舶成本系数比, 探寻使得码头前沿资源调度更合理的方案。算例设定各组船舶实际到港时间数据相同, 对比 $C_1:C_2$ 为 2:1, 1:0, 1:1, 0:1, 1:2 这 5 种比率下的泊位和岸桥联合调度方案, 计算结果见表 4。分析可得, 单纯考虑港口成本($C_1:C_2=1:0$)会使等待靠泊总时间和延迟离港时间增加, 降低客户满意率; 单纯考虑船公司成本($C_1:C_2=0:1$)会使泊位偏离距离增加, 导致港口总成本增加。当 $C_1:C_2=1:1$ 时, 船舶总等待时间为 1 h, 而在 $C_1:C_2=2:1$ 和 1:2 时分别为 4 和 6 h; 船舶离港延迟总时间为 5 h, 其余方案离港延迟总时间分别为 20 和 6 h; 靠泊偏移总距离为 40 m, 其余方案偏移总距离分别为 37 和 537 m。综上所述, $C_1:C_2=1:1$ 相对于其他成本比率更为合理, 符合港口和船公司的利益, 码头运营者在实施生产调度时可根据实际情况设定成本比率以获得合理的集装箱码头泊位与岸桥联合调度方案。

表4 不同成本比率下的计算结果

船舶	$C_1:C_2=2:1$				$C_1:C_2=1:0$				$C_1:C_2=1:1$				$C_1:C_2=0:1$				$C_1:C_2=1:2$			
编号	E_i	D_i	c_i-d_i		E_i	D_i	c_i-d_i		E_i	D_i	c_i-d_i		E_i	D_i	c_i-d_i		E_i	D_i	c_i-d_i	
1	1	9	0		1	9	0		1	5	0		1	9	790		1	9	0	
2	3	13	2		3	8	0		3	9	0		3	10	433		3	17	26	
3	5	11	28		9	14	38		5	14	6		5	18	290		5	14	16	
4	12	21	7		8	30	50		8	19	7		8	19	206		8	17	228	
5	14	25	0		14	31	0		14	26	4		14	20	422		17	24	0	
6	9	23	0		9	32	0		10	21	19		9	14	19		9	17	267	
7	11	17	0		14	24	2		11	19	4		18	23	0		14	24	0	

5 结语

对集装箱码头泊位岸桥联合调度问题进行了研究,在目标函数中考虑了复合成本,即在分析时不仅考虑船舶运输燃料费用,还考虑了港口岸桥、集卡运行费用,并通过增添缓冲时间吸收生产调度中的不确定因素影响,分析对比不同成本比率下码头前沿调度情况。算例分析表明,该优化方法可从码头和船公司两方面考虑,为集装箱码头生产运作实践提供科学合理的解决方案和决策依据。

参考文献:

- [1] Imai A, Chen H C, Nishimura E, et al. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(5):900-920.
- [2] 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.
- [3] Karam A, Eltawil A B. Functional integration approach

for the berth allocation, quay crane assignment and specific quay crane assignment problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 102:458-466.

- [4] 刘桂云,陈珊珊,张小莉,等. 基于惩罚函数的集装箱码头连续泊位-岸桥联合调度[J]. 中国航海, 2016, 39(1):115-119.
- [5] Wang Y P, Hao Y Y, Zhang Y H, et al. Berth allocation optimization with priority based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Engineering Science & Technology Review, 2018, 11(1):74-83.
- [6] 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.
- [7] 高超锋,胡志华. 岸桥并行作业效率约束下泊位与岸桥集成分派[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(3):72-78.
- [8] 谭盛强,朱瑾. 基于混合算法的多目标连续泊位-岸桥集成调度研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2015, 36(2):131-139.
- [9] 杨劼,高红,刘涛,等. 基于改进遗传算法的泊位岸桥协调调度优化[J]. 计算机应用, 2016, 36(11):3136-3140.
- [10] Liu A, Liu H, Tsai S B, et al. Using a hybrid model on joint scheduling of berths and quay cranes—From a sustainable perspective[J]. Sustainability, 2018, 10(6):1-5.
- [11] 桂小娅. 不确定性条件下集装箱码头泊位与岸桥集成调度计划建模与优化[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- [12] 张振毓,陆志强,韩笑乐. 基于前摄—反应的泊位岸桥鲁棒性集成调度[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5):1181-1190.

Compound cost based optimization method of berth and quay-crane integrated scheduling in container terminal

XU Wandong^{1,2}, LIU Guiyun^{1,2*}, WANG Ciyun¹, LUO Luyao¹

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.Ningbo Port Trade Cooperation and Development Collaborative Innovation Center, Ningbo 315832, China)

Abstract: Aiming at solving the resource and cost issues in berth and quay crane scheduling of container terminal with consideration of the influence of uncertain factors, an integrated scheduling optimization model of adding buffer time is formulated to minimize the compound cost, and an improved genetic algorithm is used to seek solution for this model. In the case of data analysis, the scheduling results of the port and shipping company under different cost ratios are compared. It is verified that the method can guarantee the customer satisfaction without damaging the terminal's own capacity, and has certain reference value for the port production operation decision-making.

Key words: container terminal; berth and quay-crane; integrated scheduling; compound cost; genetic algorithm

(责任编辑 韩超)