

文章编号:1006-7736(2008)02-0117-05

集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化*

韩 骏^{1,2}, 孙晓娜¹, 靳志宏¹

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026;

2. 中国海运(香港)控股有限公司, 香港 999077)

摘要:为缩短船舶在港停留时间,提出以船舶在港时间最小为目标的泊位与岸桥协调调度优化方法.对泊位调度与岸桥分配这两个相互关联的问题进行系统分析与集成,基于免疫遗传算法对所建模型进行相应的算法开发.对某港集装箱码头的数值仿真实验表明,泊位与岸桥协调调度比单独调度可更有效提高集装箱码头的装卸效率,减少船舶在港时间.

关键词:泊位调度;岸桥分配;协调调度;免疫遗传算法

中图分类号:U169.62

文献标志码:A

Coordinated optimization method for berth and quay crane allocation in container terminal

HAN Jun^{1,2}, SUN Xiao-na¹, JIN Zhi-hong¹,

(1. College of Transportation and Logistics,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. China Shipping (H. K.) Holdings
Co., Ltd., Hong Kong 999077, China)

Abstract: To shorten turnaround time of the ship in harbour, a coordinated optimization method for berth and quay crane allocation was developed for minimum total turnaround time of all the berthing ships. Interrelation between berth and quay-crane allocation was analyzed and integrated, and a corresponding algorithm was designed based on the immune genetic algorithm (IGA). Numerical experiments in container terminal indicate that the method can improve container handling efficiency effectively compared with that of separate allocation, and the total turnaround time is reduced.

Key words: berth allocation; quay-crane allocation; coordinated allocation, immune genetic algorithm

0 引 言

泊位调度 (berth allocation) 是指船舶到达后或

之前根据各个泊位的空闲情况和物理条件的约束为船舶安排停泊泊位和靠泊顺序. 国内外对港口泊位调度的优化研究已取得重要进展^[1-8], 但研究只局限于泊位与岸桥的单独调度. 近年来泊位调度问题的研究已在单纯的泊位调度基础上考虑了更多因素^[9-11], 但也只是针对岸桥执行具体装卸时操作顺序的微观优化. 本文在集装箱码头动态泊位调度的基础上加入岸桥分配, 建立了泊位与岸桥协调调度模型, 并利用相应的免疫遗传算法求解. 协调调度优化不仅同时解决了集装箱码头作业优化的两个核心子问题, 同时由于泊位调度和岸桥分配互相影响, 协调优化相比单独研究强调了系统优化的统一性和协调性, 大大增强了优化效果.

1 问题描述

船舶抵港前, 码头调度根据计划船舶到港时间和相关信息为船舶安排停靠泊位和港口, 使船舶总在港时间最小. 现今大部分集装箱码头的调度优化都是将泊位调度和岸桥分配分开单独调度. 图1给出了泊位与岸桥单独调度和协调调度的作业流程. 由于船舶停靠的泊位不同, 该泊位附近的岸桥工作状态不同, 导致船舶的服务时间不同. 泊位决策影响岸桥分配决策, 从而影响船舶在港时间. 协调调度在泊位调度时不仅考虑泊位空闲情况, 也考虑该泊位可用岸桥的状态, 计算停泊该泊位岸桥的装卸时间, 选择使船舶在港时间最小的泊位停靠. 而单独调度则将两个调度流程分开, 先为船舶选择最小等待时间的泊位停靠, 停靠后再分配可用岸桥. 后者忽视了岸桥分配对船舶在港时间的影响, 造成后续船舶的等待, 具有一定局限性. 协调调度避免了单独调度的

* 收稿日期: 2007-12-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70572104); 教育部博士点基金资助项目(20070151002).

作者简介: 韩 骏(1964-), 男, 辽宁大连人, 博士研究生, E-mail: hanj@enshipping.com.hk;

靳志宏(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, E-mail: jin_zhi_hong@yahoo.com.cn.

局限性,可以更有效地减少船舶总在港时间,并提高岸桥的装卸效率.

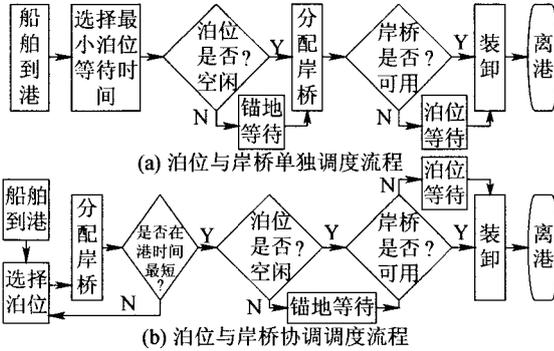


图 1 泊位与岸桥单独调度和协调调度流程对比

2 泊位与岸桥协调调度优化模型

2.1 模型假设

泊位与岸桥协调调度模型的目标是使所有船舶总在港时间最小. 船舶在港时间包括船舶等待泊位时间和服务时间. 加入岸桥分配后, 由于船舶在靠泊后不一定马上有岸桥服务, 船舶服务时间就分为等待岸桥时间和岸桥工作时间. 模型假设: (1) 每条船都必须且只能靠泊一次, 不考虑船舶靠泊后的移泊情况. (2) 船舶靠泊的泊位要满足船舶吃水水深和长度的约束. (3) 船舶停泊服务时间与停泊的位置有关. (4) 若提供某个船舶服务的岸桥超过 2 个以上, 则分配的岸桥位置必须相邻. (5) 为同一艘船舶服务的岸桥不一定同时开始工作, 但是应同时结束服务.

假设条件(1)、(2)是泊位调度的基本要求, 假设(3)的提出是由于船舶在港时间取决于码头的装卸效率, 影响码头装卸效率除岸桥外还有诸多因素, 堆场距离便是其中之一. 所谓堆场距离是指船舶停靠的泊位距离计划的集装箱存储位置的距离, 该距离影响集卡往返装卸的时间, 如距离较远, 可能引起交叉作业或者加长路线, 使装卸效率降低, 造成船舶在港时间延长. 假设条件(4)、(5)是为了满足岸桥分配的原则提出的. 2 台以上的岸桥为同一艘船舶服务时, 被分配的岸桥不一定同时都空闲, 这时可让空闲的岸桥先服务, 其他的岸桥空闲后再服务, 直到所有集装箱装卸完毕, 分配的岸桥同时停止服务. 另外岸桥分配要执行不能跨越原则, 即将连续位置的岸桥分配给同一艘船舶, 以保证岸桥的工作效率和利用率. 以上假设中除(3)是在计算装卸效率时, 通过为船舶停在不同泊位设定不同的装卸效率权重来解决, 其他假设均在模型中通过数学表达式来描述.

2.2 模型建立

设 x_{ijk} 为泊位调度的 0-1 决策变量, 当船舶 j 在泊位 i 被第 k 个服务, 取值为 1, 否则为 0. 其中, i, j, k 均为整数, $i \in B, j \in V, k \in O, B, V, O$ 分别为泊位、船舶和每个泊位上船舶停泊顺序的集合. y_{jm} 为岸桥分配的 0-1 决策变量, 即当船舶 j 被岸桥 m 服务时, y_{jm} 取值为 1, 否则取值为 0. 其中 $m (= 1, 2, \dots, M) \in C, C$ 为岸桥集合, M 为集装箱码头拥有的岸桥数量. 设 t_{A_j} 为船舶 j 的到达时刻, t_{S_j} 为船舶的停泊时刻, $t_{C_{ij}}$ 为船舶 j 在泊位 i 的装卸时间; h_{B_i} 为泊位 i 限制的物理水深, h_{V_j} 为船舶 j 的吃水深度, l_{B_i} 为泊位 i 的长度, l_{V_j} 为船舶 j 的长度; t_{SH_j} 为船舶 j 分配好岸桥后开始装卸时刻, $t_{SC_{jm}}$ 为岸桥 m 开始为船舶 j 服务的时刻, $t_{CV_{jm}}$ 为岸桥 m 为船舶 j 服务时间. 模型建立如下:

$$\min \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} x_{ijk} (t_{C_{ij}} + t_{SH_j} - t_{S_j}) + \sum_{j \in V} (t_{S_j} - t_{A_j})$$

$$= \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} x_{ijk} \left(\max_{m \in C, y_{jm}=1} t_{CV_{jm}} + \min_{m \in C, y_{jm}=1} t_{SC_{jm}} - t_{S_j} \right) + \sum_{j \in V} (t_{S_j} - t_{A_j}) \quad (1)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{k \in O} x_{ijk} = 1, \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1, i \in B, k \in O \quad (3)$$

$$t_{S_j} - t_{A_j} \geq 0, \forall j \in V \quad (4)$$

$$x_{ijk} x_{ij'k+1} (t_{C_{ij}} + t_{S_j} - t_{S_{j'}}) \leq 0, \forall i \in B, j, j' \in V, k, k+1 \in O \quad (5)$$

$$x_{ijk} (t_{DV_j} - t_{DB_i}) \leq 0, \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (6)$$

$$x_{ijk} (t_{LV_j} - t_{LB_i}) \leq 0, \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (7)$$

$$\sum_{m \in C} y_{jm} \geq 1, \forall j \in V \quad (8)$$

$$t_{SH_j} - t_{S_j} \geq 0, \forall j \in V \quad (9)$$

$$y_{jm} y_{j'm'} (t_{CV_{jm}} + t_{SC_{j'm'}} - t_{SC_{j'm}}) \cdot (t_{CV_{j'm}} + t_{SC_{j'm}} - t_{SC_{j'm'}}) \leq 0, \forall j \neq j' \in V, m \in C \quad (10)$$

$$y_{j_{m-1}} + y_{j_{m+1}} - y_{j_m} = \{-1, 0, 1\}, \forall j \in V, m-1, m, m+1 \in C \quad (11)$$

$$(t_{CV_{jm}} + t_{SC_{jm}}) y_{jm} - (t_{CV_{j'm'}} + t_{SC_{j'm'}}) y_{j'm'} = 0, j \in V, m, m' \in C, m \neq m' \quad (12)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, y_{jm} \in \{0, 1\}, \forall i \in B, j \in V, k \in O, m \in C \quad (13)$$

目标函数(1)的目的为使所有船舶总在港时间

最小. $t_{S_j} - t_{A_j}$ 表示船舶等待泊位的时间, 而船舶 j 等待岸桥的时间则为 $t_{SH_j} - t_{S_j}$. 为一艘船分配的岸桥数量在 2 台以上时, 并非所有的岸桥都同时空闲, 当有一台岸桥开始服务时, 船舶就停止等待. 所以船舶开始服务时间 t_{SH_j} 取为该船最早开始工作的岸桥服务时间, 即 $t_{SH_j} = \min_{m \in C, y_{jm}=1} t_{SC_{jm}}$, 最早开始工作的岸桥也是为该船服务时间最长的岸桥. 船舶 j 在泊位 i 的装卸时间取该岸桥的工作时间, 即 $t_{C_{ij}} =$

$$\max_{m \in C, y_{jm}=1} t_{CV_{jm}}.$$

式(2)、(3)表明每个船舶必须且只能停泊一次. 式(4)要求船舶到达之后再安排泊位. 式(5)中假设船舶 j 和 j' 为泊位 i 中第 $k, k+1$ 个停泊的船舶, 则 $x_{ijk} \cdot x_{ij'k+1}$ 为 1. 船舶 j 离开后 j' 才开始服务, 即 $t_{C_{ij}} + t_{S_j} - t_{S_{j'}} \leq 0$, 满足此约束的同一泊位上先后停泊的两个船舶服务时间不重叠. 式(6)、(7)为泊位长度和水深的约束. 式(8)表示所有的船舶都必须有岸桥服务, 可以根据集装箱量分配多台岸桥. 式(9)表示船舶必须停泊之后才开始岸桥服务. 式(10)假定一个岸桥不能同时为两艘船舶服务. 假设分配岸桥 m 为船舶 j 和 j' 服务, 当先为 j 服务后为 j' 服务时, $t_{CV_{jm}} + t_{SC_{jm}} - t_{SC_{j'm}}$ 为负数或 0, $t_{CV_{j'm}} + t_{SC_{j'm}} - t_{SC_{jm}}$ 则为正数; 反之当船舶 j' 在 j 之前服务时, $t_{CV_{jm}} + t_{SC_{jm}} - t_{SC_{j'm}}$ 为正数, $t_{CV_{j'm}} + t_{SC_{j'm}} - t_{SC_{jm}}$ 则为负数或 0. 当岸桥 m 不为船舶 j 或者 j' 服务时, $y_{jm} \cdot y_{j'm}$ 为 0, 以上情况均满足式(10). 但如果岸桥 m 同时为船舶 j 和 j' 服务, 则 $t_{CV_{jm}} + t_{SC_{jm}} - t_{SC_{j'm}}$ 和 $t_{CV_{j'm}} + t_{SC_{j'm}} - t_{SC_{jm}}$ 均大于 0, 不满足式(10). 式(11)满足岸桥不能跨越规则, 即为同一艘船服务的多个岸桥必须是连续的. 假设岸桥 $m-1, m$ 和 $m+1$ 是相邻的 3 个岸桥, 若岸桥 $m-1$ 和 $m+1$ 均为船舶 j 服务, 而岸桥 m 不为船舶 j 服务, 则 $y_{jm-1} + y_{jm+1} - y_{jm} = 2$ 不满足约束; 若 3 个岸桥均为 j 服务, 或者只有 $m-1$ 或者 $m+1$ 服务, $y_{jm-1} + y_{jm+1} - y_{jm} = 1$; 若相邻的两个岸桥为船舶 j 服务, 即 $m-1, m$ 或者 $m, m+1$ 同时为船舶 j 服务, 或者 3 个岸桥同时服务, 则 $y_{jm-1} + y_{jm+1} - y_{jm} = 0$; 若只有 m 为船舶 j 服务, $y_{jm-1} + y_{jm+1} - y_{jm} = -1$. 式(12)保证为同一艘船舶服务的多个岸桥同时结束服务. 式(13)表明 x_{ijk} 和 y_{jm} 为 0-1 决策变量.

3 模型求解

3.1 基于免疫遗传算法的优化方法

免疫遗传算法是遗传算法的演变, 用于模拟抗体机制来求解大规模 NP 难题. 与遗传算法相比, 免疫遗传算法通过对后代进行多样性调整、疫苗提取注入和在群体更新中加入记忆单元解决了经典遗传算法较早收敛和退化的问题^[12-13]. 泊位与岸桥动态协调调度是 NP 难题, 本文采用免疫遗传算法的思想, 根据数学模型设计了相应的求解算法, 其流程见图 2. 泊位调度决策用免疫遗传算法求解, 遗传操作中交叉变异采用两基因位间基因互换的 OX 交叉方法和随机选取两基因交换的变异方法.

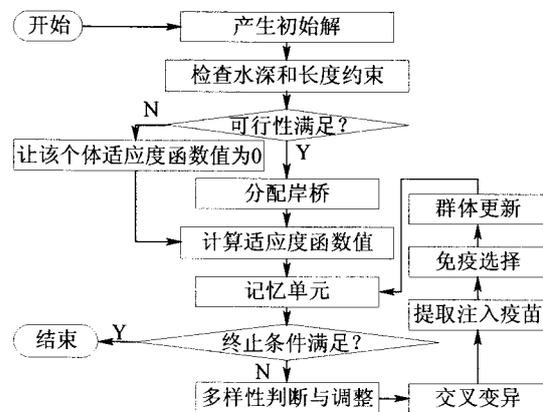


图 2 泊位与岸桥动态协调调度免疫遗传算法流程

3.2 染色体编码和遗传操作

染色体编码采用自然数编码^[5]. 如图 3 所示, 编码中每个基因表示停泊的船舶号, 每个泊位用 0 隔开, 船舶停泊的顺序为编码从左到右. 编码的长度为船舶数量加上泊位数量减 1. 相应的交叉变异操作采用 OX 交叉和点对换变异方法.

染色体	4	7	10	0	1	5	8	9	0	6	2	3
泊位号	#1	#1	#1	#2	#2	#2	#2	#3	#3	#3		
船舶号	#4	#7	#10	#1	#5	#8	#9	#6	#2	#3		
服务顺序	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3		

图 3 染色体编码

3.3 多样性判断与调整

为防止系统陷入局部最优, 在进化过程中, 加入多样性判断, 若种群的多样性过早地低于阈值, 则需要提高其多样性. 本文采用信息熵理论^[9-10]来定义种群的多样性. 假设抗体群由 N 个抗体组成, 每个抗体有 M 位基因, 编码符号集大小为 $|S|$, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{|S|}\}$, 第 j 个基因座的信息熵

位的权重依临近次序递减.根据港口在一定时间段内对每个泊位实际的最差装卸效率和最优装卸效率所做的统计,最差装卸效率约为最优装卸效率的60%,所以影响装卸效率的权重 α_{ij} 从区间(0.6,1)中随机生成.

为验证协调调度优化的优越性,本文将泊位调度和岸桥分配问题单独求解,利用免疫遗传算法求解泊位调度问题,根据求得的泊位计划用本文的岸桥分配算法来分配岸桥,重新计算在港时间,将求得的结果与泊位与岸桥协调调度优化求得的结果比较以证明协调调度的优越性(表1).协调调度优化与单独调度优化均使用本文设计的算法和算例,单独

求解泊位调度时,船舶的装卸时间取算例中生成的船舶要求的装卸时限.

4.2 结果分析

本文通过多次实验设定种群大小为800,遗传迭代次数在3000时收敛.单独调度优化与协调调度优化的算法参数设置完全相同.表1给出了单独调度优化和协调调度优化的结果比较,可以看出:相同条件下,协调优化可以使船舶在港时间减少10%以上,岸桥平均装卸效率提高5%以上.船舶到港越频繁,改善程度越高.尤其在平均到港时间间隔为3h时,在港时间缩小50%.

表1 单独调度优化与协调调度优化结果比较

平均到达间隔/h		4.8			3.9			3		
船舶数量/艘		50	75	100	50	75	100	50	75	100
平均在港 时间/h	单独优化	10.97	12.23	12.47	14.96	15.70	16.38	19.20	24.10	28.25
	协调优化	9.67	9.38	9.63	10.72	10.34	10.39	12.99	11.45	11.97
	协调优化减小量/%	11.89	23.30	22.77	28.32	34.12	36.57	32.32	52.50	57.63
岸桥平均装卸 效率/(TEU·h ⁻¹)	单独优化	34	33	33	31	31	31	29	29	30
	协调优化	35	37	37	35	36	36	34	35	35
	协调优化提高量/%	4.16	11.51	10.91	11.66	15.50	17.00	14.79	20.23	18.40

参考文献(References):

- [1] LAI K K, SHIN K. A study of container berth allocation [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1992, 26(1):45-60.
- [2] IMAI A, NAGAIWA K, CHAN W T. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1997, 31:75-94.
- [3] LEGATO P, MAZZA R M. Berth planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 133(3):537-547.
- [4] IMAI A, NISHIMURA E, PAPADIMITRIOU S. The dynamic berth allocation problem for a container port [J]. *Transportation Research, Part B* 35, 2001:401-417.
- [5] NISHIMURA E, IMAI A, PAPADIMITRIOU S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 131:282-292.
- [6] IMAI A, NISHIMURA E, PAPADIMITRIOU S. Berth allocation with service priority [J]. *Transportation Research, Part B* 37, 2003:437-457.
- [7] 周鹏飞. 面向不确定环境的集装箱码头优化调度研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2005.
ZHOU Peng-fei. Study on resource allocation under uncertainty environments in container terminal [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [8] 韩晓龙, 丁以中. 集装箱港口泊位配置优化 [J]. *系统工程理论方法应用*, 2006, 15(3):275-278.
HAN Xiao-long, DING Yi-zhong. Optimization of berth allocation problem in container terminals [J]. *Systems Engineering Theory Methodology Applications*, 2006, 15(3):275-278. (in Chinese)
- [9] DAGANZO C F. The crane scheduling problem [J]. *Transportation Research Part B* 23, 1989:159-175.
- [10] PETERKOFISKY R I, DAGANZO C F. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem [J]. *Transportation Part B* 24, 1990:159-172.
- [11] KIM K H, PARK Y M. A crane scheduling method for port container terminals [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156:752-758.
- [12] 张毅, 杨秀霞. 一种新的免疫遗传算法及其在 TSP 问题中的应用 [J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(1):117-120.
ZHANG Yi, YANG Xiu-xia. New immune genetic algorithm and its application on TSP [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(1):117-120. (in Chinese)
- [13] LIN Chia-hung, CHEN Chao-shun, WU Chia-jean. Feeder reconfiguration for distribution system contingencies with immune algorithm [J]. *IEEE Porto Power Tech Conference*. 2001, 3:6-11.