

[文章编号] 1007-7405(2016)06-0442-06

基于模拟退火算法的集装箱场桥调度优化

李淑娟^{1,2}, 初良勇^{2,3}

(1. 仰恩大学管理学院, 福建 泉州 362014; 2. 集美大学航海学院,
福建 厦门 361021; 3. 集美大学现代物流研究中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了降低码头的运营成本, 提高客户满意度, 在分析集卡送箱进场作业流程的基础上, 运用时间窗函数, 建立以场桥与集卡相互等待时间最短以及场桥移动距离最短为目标的数学模型, 根据模型特点设计模拟退火算法, 实例数据代入的结果验证了该模型及算法的有效性。

[关键词] 集装箱场桥; 调度; 模拟退火算法

[中图分类号] U 691.3

Optimization of Container Crane Scheduling Based on Simulated Annealing Algorithm

LI Shu-juan, CHU Liang-yong

(1. School of Management, Yang'en University, Quanzhou 362014, China;
2. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;
3. Modern Research Center of Logistics, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to reduce the operation costs of terminals and increase the satisfaction level of their customers, this paper establishes a model with time window function aimed at shortest waiting times for both the container crane and lorry as well as shortest moving distances for the crane, based upon the analysis on the procedure of lorries delivering containers to the yard. A simulated annealing algorithm is designed according to the characteristics of the model. Results from actual instance data imported prove the validity of the model and algorithm.

Key words: container crane; scheduling; simulated annealing algorithm

0 引言

集装箱堆场作为暂存集装箱的重要场地, 在码头作业中起到了重要的缓冲作用, 其运作效率极大地影响着码头的装卸效率、船舶在港时间、客户满意度等。集装箱场桥作为堆场中最主要的装卸设备, 其调度优化问题成了国内外研究热点。

目前, 国内外的研究主要针对场桥的作业路径、作业时间、配置数量等展开, 如文献[1]提出轮胎式龙门起重机的路径选择问题, 以减少龙门吊无用作业时间为目标, 建立了数学模型; 文献

[收稿日期] 2016-02-01

[修回日期] 2016-10-02

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2012J01302); 福建省教育厅科技项目(JA10195); 厦门市科技项目(3502Z20143022); 厦门市科技项目(3502Z20113032)

[作者简介] 李淑娟(1990—), 女, 助教, 从事集装箱物流、港口物流研究; 通信作者: 初良勇(1973—), 男, 副教授, 从事集装箱物流研究。

[2] 以龙门吊作业路径最短为目标,建立了龙门吊调度优化模型;文献[3]以堆场作业的延迟最小为目标,建立整数规划模型;文献[4-5]运用模拟的方法比较了不同数量配置策略下龙门吊的使用效率、作业量以及等待时间等问题。还有部分研究是将场桥的调度与外集卡、码头岸吊、船舶到港等问题结合起来考虑,如文献[6]建立了以等待岸桥、场桥作业时间与集卡运输时间之和最小为目标的联合调度优化模型。在问题的解法上,多数研究以智能优化算法为主,采用遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法等,如文献[7-9]运用模拟退火算法对多场桥调度优化模型进行求解;文献[10]通过静态和动态求解算法进行求解,并运用仿真算例验证了模型的有效性;文献[11]将模拟退火算法和启发式算法相结合,求解场桥行走路径及取箱方案。

在诸多研究中,考虑到外集卡因素的并不多。从某种程度讲,外集卡等待时间和场桥等待时间、场桥移动时间是相互矛盾的,外集卡等待时间的缩短在一定程度上会增加场桥的等待和移动的时间。本文在考虑场桥移动成本的基础上,应用时间窗惩罚函数综合考虑场桥等待时间和外集卡等待时间,以期降低码头运营成本,提高客户服务水平。

1 集装箱场桥调度优化模型的建立

1.1 问题描述

集装箱堆场由若干箱区组成,箱区内包含若干贝位,每个贝位可以存放若干个集装箱。堆场分为出口箱区和进口箱区。出口集装箱在装船前需提前送到堆场,由堆场调度室安排指定存放位置并将信息导入电脑系统中。外集卡司机送箱进场到达堆场大门处,大门门卫与调度室联系,获得集装箱的具体存放贝位并告知外集卡司机,外集卡司机将集装箱送至堆场内的指定位置,堆场箱控室联系场桥司机到达集装箱指定位置进行集装箱装卸操作,具体操作流程如图1所示。

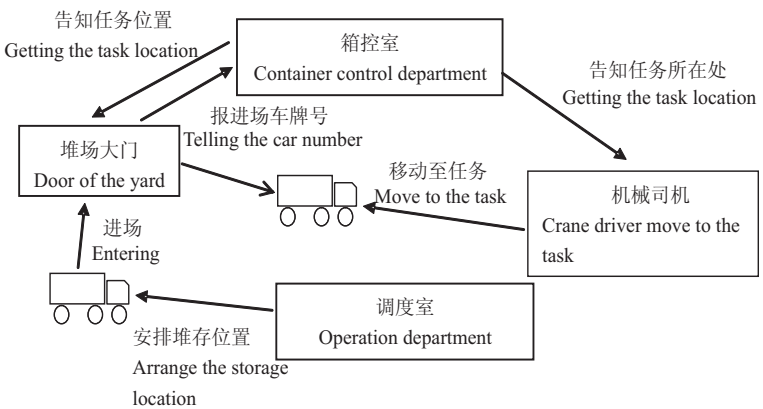


图1 场桥对进场箱的操作流程图

在单箱区内,外集卡进场时间并不集中,场桥司机接到任务通知后,按就近操作的原则逐一进行任务操作。当操作任务量多的时候,就经常会出现集卡等待场桥的情况。随着信息技术的不断发展,很多码头实施外集卡进场预约的方式,在能够确定集卡到达时间的前提下,场桥适当地等待集卡将很大程度上减少场桥的来回移动,但是为了避免外集卡等待时间过长,本文引入时间窗惩罚函数,控制外集卡等待时间和场桥等待时间,以期获得场桥的最佳调度顺序。

1.2 模型的假设条件

- 1) 由于模型只针对单箱区单场桥,所以假设所有待操作任务处于同一箱区内;
- 2) 所有外集卡送箱进场的时间是可以提前预知的,由此方可实现整个调度顺序的全局性规划;
- 3) 箱区内的所有贝位均一致用于存放 20 尺 (6.058 m × 2.438 m × 2.591 m) 标准箱,从而可以规范场桥的移动步长;
- 4) 一个箱区内仅有一台场桥。

1.3 模型的建立

为了尽可能缩短场桥的移动距离,同时考虑外集卡的等待时间,本文利用时间窗设定惩罚函数,以场桥与集卡相互的等待时间及场桥移动成本最小为目标函数。场桥从任务 i 移动至任务 j 的距离 d_{ij} =

$|B_{ki} - B_{kj}| \times l$ 。其中： i, j 为每个进场外集卡所运载的集装箱，称其为任务号，按照进场顺序逐一进行编号， $i, j = 1, 2, \dots$ ； l 为单位贝位的距离； B_{ki} 、 B_{kj} 表示任务对应的贝位， k 取 $1, 2, \dots, n$ 。

设目标函数为： $\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} C + \sum_{i=1}^n P_i(s_i)$ 。其中： C 为场桥的移动成本； $P_i(s_i)$ 为场桥与集卡相互等待的罚金； x_{ij} 为判断函数，用于判断场桥操作完成任务 i 后紧接着是操作任务 j ，即 $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{表示场桥从任务 } i \text{ 移动到任务 } j, \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$

为了保证每个任务只被操作一次，因此限定： $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1$ 。 $\sum_{i=1}^n P_i(s_i)$ 则表示场桥等待集卡和集卡等待场桥的罚金，具体表示为：

$$\sum_{i=1}^n P_i(s_i) = \begin{cases} a(ET_i - s_i), & s_i < ET_i, \\ 0, & ET_i \leq s_i \leq LT_i, \\ b(s_i - LT_i), & s_i > LT_i. \end{cases}$$

其中： ET_i 为集卡期望被服务的时间，此处将 ET_i 视为集卡到达的时间； s_i 为场桥到达的时间，当场桥到达任务的时间早于集卡到达任务的时间，给予单位时间 a 的罚金； LT_i 为集卡期望被服务的时间上限，此处 LT_i 为 30 min，即超过 30 min 后集卡任务仍未被操作，给予单位时间 b 的罚金。

另外，由于场桥必须等外集卡运载任务到达贝位所在处，方可开始任务操作，即场桥从上一个任务移动到任务所在处的时间 s_i 可表示为： $s_i = f_{i-1} + t_{i-1,i}$ 。其中： f_i 表示场桥完成任务操作的时间； $t_{i-1,i}$ 表示场桥从上一个任务移动到任务所在处的时间。

而集卡要开始进行任务操作，必须是在场桥移动到任务所在处和外集卡运载任务到达任务所在处的前提下方可进行，因此 $f_i = T_i + \max\{f_{i-1} + t_{i-1,i}, R_i\}$ 。其中： T_i 为场桥操作任务 i 所花费的时间； R_i 为外集卡到达任务的时间。

2 模拟退火算法的模型求解

本文所研究的场桥调度优化问题属于非确定性多项式求解问题，针对此类问题的求解除了传统的优化方法，目前还有许多智能算法，可以求解大规模的调度问题。模拟退火算法具有初值鲁棒性强、简单、通用、易实现等优点，因此本文采用模拟退火算法进行求解，其算法流程图如图 2 所示。具体流程如下：

1) 初始化，任选初始解，给定初始温度 T_0 和终止温度 T_f 。令迭代指标 $k = 0$ ， $T_k = T_0$ ，根据 $T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$ (α 为降温系数) 实现降温的过程。根据模型的特点，状态采用顺序编码来表示，即按待操作

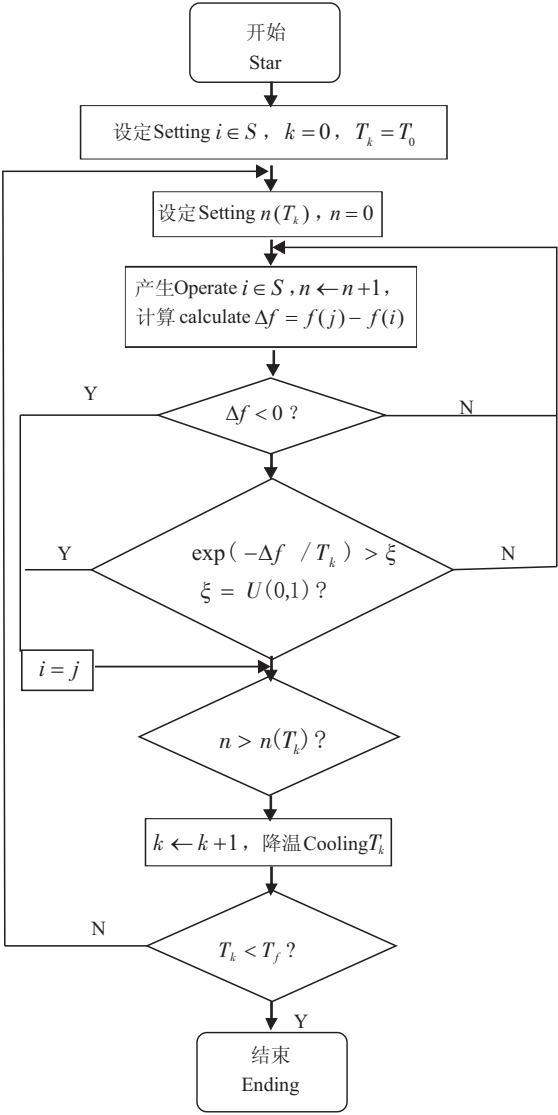


图 2 模拟退火算法流程图

Fig.2 The flow chart of simulated annealing algorithm

任务的顺序进行编码, 任务按场桥的操作顺序进行排列, 例如 [2 4 1 3] 就表示场桥按照任务 2-4-1-3 的顺序进行操作。

2) 随机产生一个邻域解 $j \in N(i)$, 计算目标值的增量 $\Delta f = f(j) - f(i)$ 。本文中邻域的定义为场桥操作顺序中两两位置互换的集合, 那么从当前状态进行两个任务顺序的调换, 则可以得到一个新的状态, 实现一次邻域的移动, 例如 [2 4 1 3] 交换 4 和 3 的位置则可得到场桥一个新的操作顺序 [2 3 1 4]。

3) 计算目标函数的增量 Δf , 如果增量 $\Delta f \leq 0$, 那么接受新解, 替换当前解; 如果增量 $\Delta f > 0$, 则通过判断 $\Delta f/T_0$ 与 $(0, 1)$ 之间的随机数对比, 若 $\Delta f/T_0 > \text{rand}(1)$, 则接受新解, 进入第 4 步。

4) 若达到热平衡 (内循环次数大于 $n(T_k)$), 则转第 5 步, 否则转第 2 步。本文中, 根据 T_k 来设置内循环的次数, 当 T_k 较大时, 内循环次数较少, 当 T_k 减小时, 内循环次数增加。

5) 降低 T_k , $k = k + 1$ (k 为迭代次数) 即若 $T_k < T_f$, 则算法停止, 否则转至第 2 步。

3 实例验证

本文选取厦门海天码头出口箱区内的某一箱区为例, 该箱区包括 36 个贝位, 最高堆垛为 5 层, 在观察期 1.5 h 内到达箱区的任务数量及具体到达时间见表 1。设定场桥的移动速度为 120 m/min, 单位贝位长度为 7 m, 通过场桥移动距离除以移动速度可以得到场桥从上一个任务移动到下一个任务的时间。对于罚金中的 a 和 b 值则可以根据码头具体规定设定, 若是倾向于码头的运营成本, 则可以设定 $a > b$, 本文设定 $a = 50$ 元/单位, $b = 20$ 元/单位。实验的软件环境为 Matlab-2009, 硬件环境为 Intel (R) Core (TM) i3, 2.73 GHz 的处理器。

表 1 实例数值
Tab.1 Example Numerical

任务 Task	贝位 Bay	集卡到达时间 Reach time of container car/min	场桥操作时间 Operation time of the crane/min	任务 Task	贝位 Bay	集卡到达时间 Reach time of container car/min	场桥操作时间 Operation time of the crane/min
1	7	4	2.0	9	11	39	3.0
2	17	6	1.5	10	6	46	3.0
3	15	10	3.5	11	4	52	2.5
4	2	12	3.5	12	14	58	3.0
5	4	15	4.0	13	7	70	2.5
6	9	19	3.0	14	29	85	3.0
7	20	25	3.5	15	3	90	2.5
8	2	30	2.5	-	-	-	-

海天码头堆场的调度顺序, 一般来说等待时间不超过 1 h 内的任务, 按就近操作的原则进行, 对于等待时间超过 1 h 以上的任务, 则会安排司机优先处理。按照码头实际操作顺序可以得到目标函数为 23 162.177 元, 操作顺序为任务 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15。若按本文设计的调度优化模型, 根据模拟退火算法, 程序运行 16.75 s 后得到罚金总额为 10 626.67 元, 相比实际操作得到了优化, 场桥的操作顺序为 2-7-3-9-6-1-10-5-11-4-8-15-13-12-14, 相应的贝位为 17 贝-20 贝-15 贝-11 贝-9 贝-7 贝-6 贝-4 贝-2 贝-2 贝-3 贝-7 贝-14 贝-29 贝。场桥操作顺序的优化路径图如图 3 所示 (图中 (1), (2), ..., (15) 表示优化后的场桥操作顺序), 从图 3 中也可以看出, 场桥在箱区内来回移动的次数减少了, 从而提高了场桥的操作效率, 降低了运营成本。目标函数的收敛性分析图如图 4 所示, 从图 4 可以看出在超过 200 次的迭代后, 目标函数值趋于稳定, 即模拟退火算法在温度下降到一定水平之后, 算法每次迭代的目标函数值趋于一致, 算法趋于稳定, 这也就意味着, 模拟退火算法在全局范围内已找到了最优解, 因此可以看出模型的有效性。

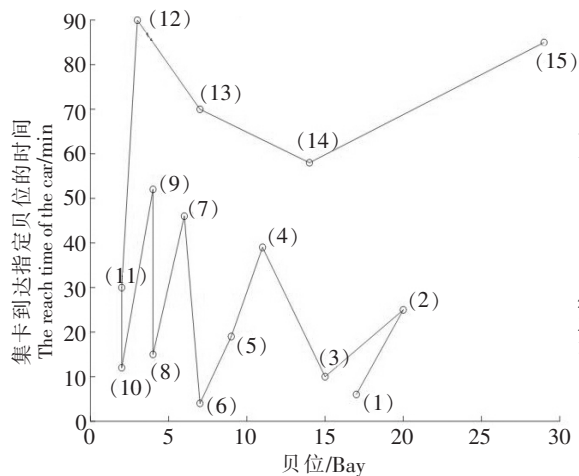


图 3 场桥操作顺序图

Fig.3 Sequence diagram of Crane

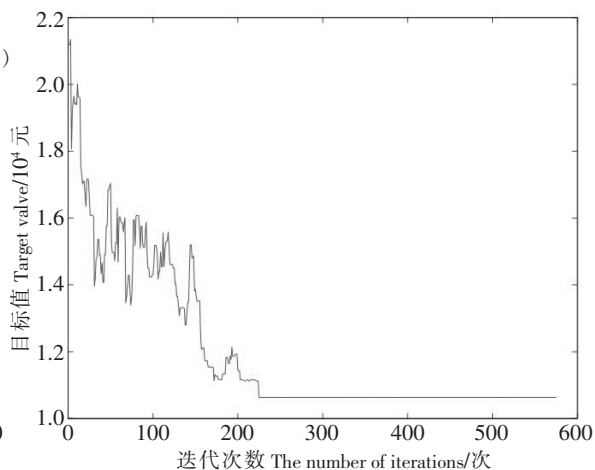


图 4 目标值的收敛性分析图

Fig.4 Convergence analysis diagram of target value

4 总结

堆场作为衔接码头前沿和后方货主的重要物流节点,其效率的高低直接影响到码头的运作效率和客户满意度。外集卡送箱和取箱时等待操作时间在很大程度上决定了货主对码头服务水平的评价。本文以场桥移动路径最短为目标,同时利用惩罚函数约束场桥等待集卡和集卡等待场桥的时间,建立了以场桥移动成本和等待时间惩罚函数最小为目标的数学模型,同时利用模拟退火算法进行求解,最后利用实例数据验证了模型的有效性。在实际操作中,堆场的每个箱区并不是都会配置场桥的,因此经常会出现有些箱区外集卡排队等候,而有些箱区场桥闲置的现象。而且不同的场桥操作司机,任务的操作时间也会出现偏差,因此在本文研究的基础上,可以将多场桥多箱区的调度优化问题作为下一步的研究内容。另外,场桥的作业效率不仅仅取决于场桥的调度顺序,还与堆场的布局和场桥的移动路径有关,因此,优化堆场的布局和场桥的移动路径也是提高堆场作业效率的有效途径。

[参考文献]

- [1] CHUNG Y G. A simulation analysis of a tearstained - based container handling facility. *Computers & Industrial Engineering*, 1988, 14(2): 113-125.
- [2] KAP HWAN KIM, KANG TAE PARK. Anote on a dynamic space-allocation method for outbound container. *European Journal of Operational Research*, 2003, 148(1): 92-101.
- [3] ZHANG C. Dynamic crane deployment in container storage yards. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2000.
- [4] LAI K K, LAM K. A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong. *International Journal of Modeling and simulation*, 1994, 14(3): 134-138.
- [5] LAM GAMBARDELLA, MASTEROLLI M, RIZZOLI A E. Anoptimization methodology for intermodal terminal management. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2001(12): 521-534.
- [6] 徐远琴, 韩晓龙. 集卡与岸桥及场桥联合调度模型. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2013, 32(2): 318-321.
- [7] 张琪. 考虑作业干涉的多场桥存取箱优化问题研究. 大连: 大连海事大学. 2013.
- [8] 郑红星, 于凯. 基于混合遗传算法的混堆箱区内场桥调度研究. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(5): 150-158.
- [9] 郑红星, 吴岳, 杨文滔, 等. 混堆模式下多箱区场桥联合调度. *水运工程*, 2015(4): 113-119.
- [10] 邵乾虔, 徐奇, 边展, 等. 考虑了交箱时间不确定性的场桥堆存作业优化. *系统工程理论与时间*, 2015, 35(2): 394-405.
- [11] 韩晓龙, 郎昊. 基于模拟退火算法的场桥调度研究. *广西大学学报 (自然科学版)*, 2015, 40(2): 427-435.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)