

集卡作业面模式下装船作业场桥与集卡联合调度优化

曹朋亮¹, 姜桂艳^{1,2,3*}, 杜春承¹, 陈伟帅¹

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 国家道路交通安全管理工程技术研究中心宁波大学分中心, 浙江 宁波 315211;
3. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210000)

摘要: 为进一步减少集装箱船舶靠泊时间, 在岸桥多线作业工况条件下, 重点考虑了场桥与集卡的同步作业, 对场桥与集卡进行联合调度. 在此基础上, 综合考虑场桥间安全距离、任务优先顺序等实际约束, 针对集卡作业面模式, 构建了以装船作业时间最短为目标的场桥与集卡联合调度优化模型, 并开发了带染色体更新操作的改进遗传算法确定场桥作业量, 利用路径优化确定场桥最短行驶路径, 基于先到先服务规则对集卡进行动态调度. 实证分析结果证明了所提出模型与算法的有效性, 并且在集卡数量较少时, 采用集卡作业面模式有助于缩短集装箱装船时间.

关键词: 集装箱港口; 装船作业; 场桥; 集卡; 联合调度优化

中图分类号: U693.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 05-0108-07

受金融危机影响, 港口竞争日益激烈. 对港口作业设备进行科学管理和调度, 是提升港口竞争力的有效途径. 装船和卸船是集装箱港口的两种主要业务, 但由于出口箱堆存情况复杂, 且装船过程有着更为严格的任务优先顺序与作业时间等限制^[1-2], 因此, 在装船作业条件下, 对港口设备的调度策略进行优化, 进而缩短船舶靠泊时间已成为港口的重要研究课题.

场桥与集卡对岸桥的作业效率具有决定性影响, 为降低优化难度, 已有多项研究对二者分别进行调度优化^[3-7]. 而在港口实际生产中, 场桥和集卡的作业过程联系紧密, 单设备调度优化也缺乏整体性, 不利于港口设备整体作业效率的进一步提升. 随着优化理论与方法的进步, 场桥与集卡的联合调度逐渐受到研究者的关注.

Chen 等^[8]将集装箱港口设备联合调度视为带优先顺序和箱区约束的混合流水车间问题, 建立最小化总作业时间的优化模型, 并运用改进的禁忌搜索算法求解了该模型. 在此基础上, Chen 等^[9]提出了改进的三阶段求解算法对上述模型进行了求解. Cao 等^[10]将场桥与集卡的联合调度视为两阶

段柔性流水车间问题, 以装船作业时间最小为目标建立 MIP 模型, 使用传统和改进的 Benders 分解法对模型进行求解. Le 等^[11]也提出了类似的调度优化模型, 但采用多层遗传算法对优化模型进行求解, 证明了遗传算法求解此类问题的有效性. 综合来看, 港口设备调度优化已从单一设备调度向多设备联合调度发展, 但已有场桥与集卡联合调度成果均以作业线调度为对象, 未考虑集卡在多作业线间共享的情况, 虽然降低了调度难度, 但是限制了港口作业效率的进一步提升.

场桥与集卡联合调度问题属于 NP 难问题^[10], 难以用精确算法进行求解. 遗传算法因具有较强的鲁棒性以及全局搜索能力, 在 NP 难问题求解方面得到了广泛应用, 也取得了良好效果^[12-14], 因此本文将应用遗传算法对场桥与集卡联合调度问题进行深化研究.

针对现有研究中存在的问题, 在场桥间安全距离和装船任务优先顺序约束下, 本文以装船作业时间最短为目标, 建立面向集卡作业面模式的场桥与集卡联合调度优化模型, 将遗传算法、路径优化方法和集卡先到先服务规则相结合, 设计求

收稿日期: 2016-11-16.

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

基金项目: 宁波大学研究生科研创新基金项目; 宁波大学大学生科技创新计划项目; 包兆龙包玉刚中国留学生奖学金.

第一作者: 曹朋亮 (1993-), 男, 河南洛阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 智能运输系统. E-mail: dreamcpl@126.com

*通信作者: 姜桂艳 (1964-), 女, 黑龙江鸡西人, 博导/教授, 主要研究方向: 智能运输系统. E-mail: jiangguiyan@nbu.edu.cn

解算法, 并通过数值实验对模型及其求解算法的有效性进行实证分析。

1 问题描述

目前, 大部分集装箱港口仍采用传统的集卡作业线模式, 即每台岸桥固定分配一定数量集卡进行作业, 该模式虽有利于单作业线效率的稳定和提高, 但易导致不同作业线因作业量不均衡而出现资源浪费的现象。因此, 为进一步提高港口作业效率和服务水平, 应采用集卡作业面模式, 使集卡在所有作业线间共享, 实现多作业线混合装船。

为建立合理的场桥与集卡联合调度优化模型, 本文做出如下假设: (1)待装船集装箱的数量及堆存位置均已知。港口通常根据集装箱的货类、尺寸、重量和目的港等因素, 将具有相同特征的集装箱视为1个装船任务。将每个出口箱视为1个装船作业, 每个装船任务为1组装船作业。(2)各作业线所负责的装船任务及其优先顺序已知, 但不同作业线间无任务优先顺序限制。(3)所有集卡每次仅运载1个集装箱。(4)场桥只能在同排箱区间移动。由于场桥在向其他排箱区转移时, 需进行转向操作, 但其速度较慢, 需长时间占用道路资源, 易引起场内交通阻塞, 因此应尽量避免场桥在不同排箱区间的转移操作。

2 模型构建

2.1 参数设置

t 为当前调度时刻, $t=1, 2, \dots, T$ 。 k 为装船作业, $k=1, 2, \dots, K$ 。 p 为第 p 排箱区, $p=1, 2, \dots, P$ 。 r 为箱区, $r=1, 2, \dots, R$ 。 l 为岸桥, $l=1, 2, \dots, L$ 。 m 为场桥, $m=1, 2, \dots, M$ 。 n 为集卡车, $n=1, 2, \dots, N$ 。 U_k 为装船作业 k 所属任务编号。 B_m^t 为场桥 m 在时刻 t 所处贝位。 C_p^p 为第 p 排箱区的第 m 台场桥所负责的装船作业量。 M_p 为第 p 排箱区内的场桥数量。 $W_{i,j}^t$ 为 t 时刻从箱区 i 移动到箱区 j 的场桥数量, $i, j \in R$ 。 Z_{line} 为均衡参数, 表示同排箱区场桥装船作业量分配不均衡底线。 t_l 为岸桥将集装箱从集卡提起至装上船舶所用时间。 $t_{n,Rea}^l$ 为集卡 n 到达岸桥 l 处的时刻。 $t_{m,Rea}^k$ 为场桥 m 到达装船作业 k 所在贝位时刻。 $t_{n,Rea}^k$ 为集卡 n 到达装船作业 k 所在贝位时刻。 θ 为一个足够大的整数。

决策变量如下:

$$X_{k,t}^m = \begin{cases} 1, & \text{场桥 } m \text{ 在 } t \text{ 时刻完成装船作业 } k, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$X_{k,t}^n = \begin{cases} 1, & \text{集卡 } n \text{ 在 } t \text{ 时刻完成装船作业 } k, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$X_{i,j}^m = \begin{cases} 1, & \text{场桥 } m \text{ 在完成装船作业 } i \text{ 后进行装船} \\ & \text{作业 } j, i, j \in K, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$X_{i,j}^n = \begin{cases} 1, & \text{集卡 } n \text{ 在完成装船作业 } i \text{ 后进行装船} \\ & \text{作业 } j, i, j \in K, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$Y_{k,t}^l = \begin{cases} 1, & \text{岸桥 } l \text{ 在 } t \text{ 时刻开始执行装船作业 } k, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$Y_{k,t}^m = \begin{cases} 1, & \text{场桥 } m \text{ 在 } t \text{ 时刻开始执行装船作业 } k, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$Y_{k,t}^n = \begin{cases} 1, & \text{集卡 } n \text{ 在 } t \text{ 时刻开始执行装船作业 } k, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

2.2 数学模型

根据上述变量, 可得到如下表达式:

$$C_{k,max}^l = \max \left\{ \sum_{t=1}^T t \times Y_{k,t}^l + t_l \right\},$$

则目标函数为:

$$\min C_{k,max}^l. \quad (1)$$

目标函数(1)表示装船作业时间最短, 即作业时间最长的岸桥工作时间最小化。

约束条件如下:

$$\sum_{p=1}^P C_p^p \times M_p = K, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T X_{k,t}^m = 1, \forall k, \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T X_{k,t}^n = 1, \forall k, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i,j}^m = \sum_{k=1}^K X_{j,i}^m = 1, \forall i, j \in K, \forall m, \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i,j}^n = \sum_{k=1}^K X_{j,i}^n = 1, \forall i, j \in K, \forall n, \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^P M_p = M, \quad (7)$$

$$|C_i^p - C_j^p| \leq Z_{line}, \forall i, j \in M, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^R W_{i,j}^t + W_{j,i}^t - \sum_{j=1}^R W_{j,i}^t \leq 2, \forall i, j \in M, \forall t, \quad (9)$$

$$|B_i^t - B_j^t| \geq 1, \forall i, j \in M, \forall t, \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{k,t}^m = \sum_{n=1}^N X_{k,t}^n = 1, \forall k, t, \quad (11)$$

$$Y_{k,t}^m = \max\{t_{m,\text{Rea}}^k, t_{n,\text{Rea}}^k\}, \forall m, n, k, \quad (12)$$

$$X_{k,t}^m \leq \theta Y_{k,t}^m, \forall m, k, t, \quad (13)$$

$$X_{k,t}^n \leq \theta Y_{k,t}^n, \forall n, k, t, \quad (14)$$

$$Y_{k,t}^l \leq t_{n,\text{Rea}}^l, \forall n, l, k, \quad (15)$$

$$\max\{t_{m,\text{Rea}}^i, t_{n,\text{Rea}}^i\} - \max\{t_{m,\text{Rea}}^j, t_{n,\text{Rea}}^j\} \leq \theta(U_j - U_i), \forall i, j \in K, \quad (16)$$

(2)式表示所有装船作业都被加入作业序列; (3)式表示每个装船作业由1台场桥完成; (4)式表示每个装船作业由1辆集卡完成; (5)式表示所有场桥有连续的装船作业安排; (6)式表示所有集卡有连续的装船作业安排; (7)式表示所有箱区所配置的场桥数之和为 M ; (8)式表示每排箱区内各场桥作业量差不超过不平衡底线 Z_{line} ; (9)式表示任意时刻各箱区场桥数不超过2台; (10)式表示所有场桥在任意时刻均保持至少1个贝位间距; (11)式表示任意时刻正在工作的场桥或集卡数之和不超过其总数; (12)式表示场桥和集卡都到达了作业所在贝位后才开始进行提箱操作; (13)式表示若要完成提箱操作, 则场桥在该作业所在贝位停驻至操作结束; (14)式表示若要完成提箱操作, 则集卡在该作业所在贝位停驻至操作结束; 式(15)表示若要完成装船作业, 则集卡必须到达岸桥处且岸桥处于空闲状态; (16)式表示各场桥必须按照任务顺序进行作业。

3 算法设计

装船作业总量一定时, 场桥提箱时间也相对确定, 此时均衡分配各场桥作业量以及最小化场桥行驶时间是提高场桥作业效率的有效途径。对此, 本文采用作业量编码方式, 首先通过遗传算法分配各场桥作业量, 并引入染色体更新操作以保证所有染色体均满足场桥作业量均衡约束; 随后利用路径优化方法安排各场桥作业路径, 以最小化场桥行驶时间。此外, 为保证场桥与集卡的作业过程能够高度同步, 引入先到先服务原则, 对集卡进行动态调度。算法具体流程如图1所示。

3.1 初始种群生成

港口实际作业中, 同排相邻箱区通常属于同一条作业线, 所以本文以1排箱区为单位对场桥作业量进行分配。初始种群个体的生成方式是根据

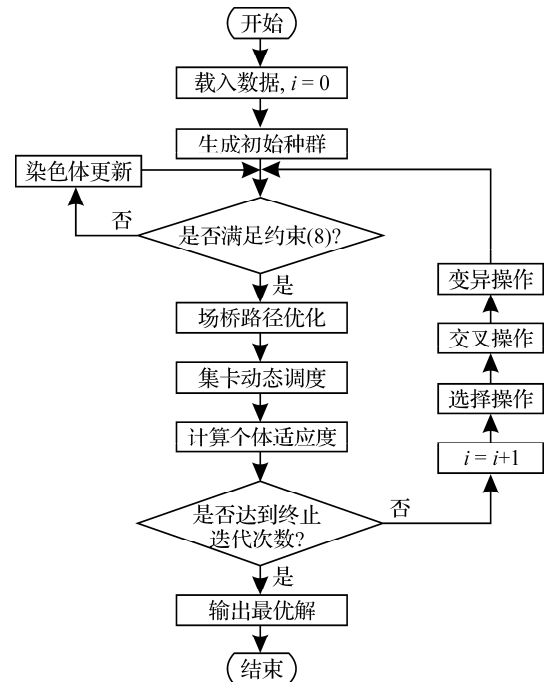


图1 算法流程图

第 p 排箱区场桥配置数量 M_p , 将该排箱区分为 M_p 个区域, 每个场桥负责1个区域内的所有装船作业, 将各场桥的作业量 C_m^p 按照场桥编号排序, 即得到初始染色体。

3.2 染色体编码

本文采用十进制染色体编码, 第 m 个基因位代表场桥 m 的装船作业量 C_m^p , 因此染色体长度为 M 。图2所示为1个场桥作业量分配示例, 该示例中共有4个箱区, 每排箱区分别有2台和3台场桥, 由图可知, 其对应染色体为 $[2, 7, 3, 4, 4]$, 其中 $[2, 7]$ 为第1排箱区对应染色体片段, $[3, 4, 4]$ 为第2排箱区对应染色体片段。

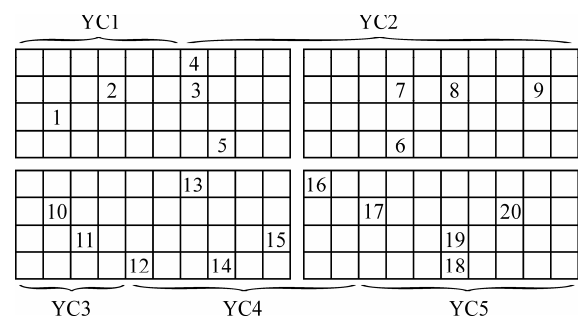


图2 场桥作业量分配示例

3.3 染色体更新操作

为避免场桥作业量差异较大的无效个体占用过多计算资源, 本文通过合理设置均衡参数 Z_{line} 的

初始值,以及引入染色体更新操作以提升算法的运算效率.更新操作原理是将染色体中不满足约束(8)式的某排箱区对应片段中的最大值-1,同时将最小值+1,算法在每次更新操作后重新检测染色体是否满足约束(8)式,若不满足则重复更新操作至满足均衡约束.以图2染色体为例,假设算法初始时刻设定 $Z_{\text{line}} = 1$,则该染色体不满足约束要求,需对其进行2次更新操作,其过程如图3所示.

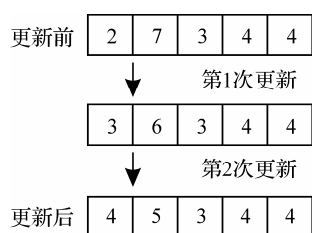


图3 染色体更新操作示例

3.4 场桥路径优化方法

表1给出了图2中每个装船作业所对应的任务编号,其中任务编号即为装船任务优先顺序.由于同一任务各作业属性相同,所以场桥对同一任务的装船作业可进行顺次提箱,而场桥在处理完每个任务后,会停留在最后一个作业所在贝位;在切换至下一个任务前,场桥需移动到下个任务的初始作业位置,然后进行顺次提箱.

路径优化方法用于为场桥规划最短的任务切换行驶路径,以减少场桥行驶时间.路径优化方法将场桥在不同装船任务间切换时的行驶方式归纳为3种情形:(1)若待装船任务的作业位于场桥停留贝位同侧,则距离最近的作业即为初始作业;(2)若待装船任务的作业位于场桥停留贝位两侧,但场桥与两侧最远作业距离不同,则较近一侧尽头的作业即为初始作业;(3)若待装船任务的作业位于场桥停留贝位两侧,且场桥与两侧最远的作业距离相同,则随机选择一侧尽头的作业为初始作业.表2给出了基于路径优化方法优化后图3中所示的各场桥作业序列.

3.5 集卡动态调度

集卡调度过程以先到先服务规则为基础,将最先通过岸桥的集卡动态地分配给最先需要服务的场桥,从而实现集卡作业面动态调度.此外,考虑到港口生产过程中调度设备较多且调度过程复杂,本文采用时间驱动编码方式.集卡调度过程具

表1 图2中作业编号与装船任务对应关系

任务编号	任务包含作业编号
任务1	1、3、5、11、14、15
任务2	7、9、12、16、19、20
任务3	2、4、6、8、10、13、17、18

表2 路径优化方法所得结果

场桥编号	作业序列
YC1	1—3—5—4—2
YC2	7—9—8—6
YC3	11—12—13—10
YC4	14—15—16
YC5	19—20—18—17

体步骤如下:

Step1 变量初始化,当前调度时刻 $t = 0$.

Step2 当前调度时刻 $t = t + t_{\text{set}}$,开始执行装船作业. t_{set} 为时间步长,即每次刷新设备作业状态的时间间隔.

Step3 判断是否发生场桥间相互跨越或同贝作业,若是,则终止程序,并输出装船作业时间 $T_{\text{end}} = \infty$;否则,执行 Step4.

Step4 判断是否所有场桥都已完成规定任务,若是,则执行 Step5;否则,执行 Step6.

Step5 判断是否所有集卡都已完成装船作业,若是,则终止程序,并输出装船作业时间 $T_{\text{end}} = t$;否则,执行 Step6.

Step6 判断是否存在空闲集卡,若是,则执行 Step7;否则,执行 Step2.

Step7 判断是否存在待服务场桥,若是,则执行 Step8;否则,执行 Step2.

Step8 判断待服务场桥下个作业所属任务是否符合作业线进度,若是,则为场桥分配最先空闲的集卡为其服务,并执行 Step2;否则,执行 Step2.

3.6 适应度值计算

由于目标函数是求最短装船作业时间,所以装船作业时间最短染色体的适应度最高,适应度值计算方式如下:

$$Z_{\text{Fit}} = 1 / \max \left\{ \sum_{t=1}^T t \times Y_{k,t}^l + t_l \right\}. \quad (17)$$

3.7 遗传操作

遗传操作包括选择操作、交叉操作和变异操作.

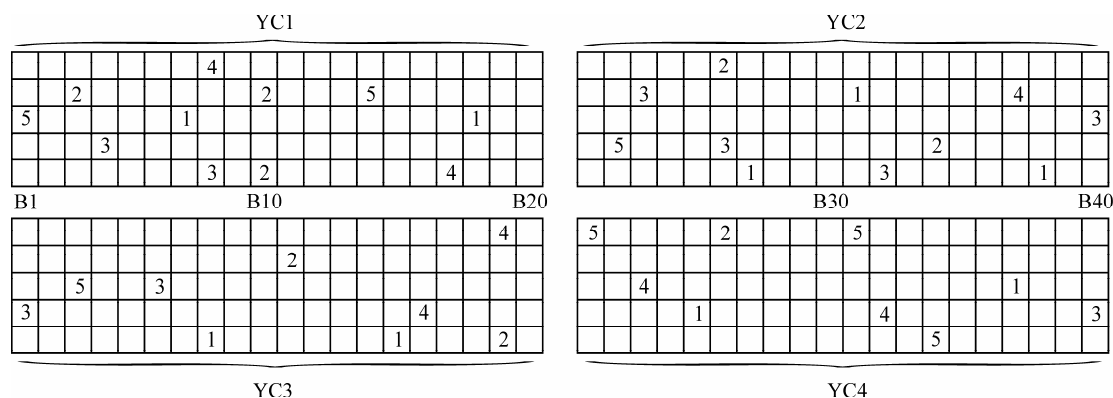


图4 装船作业分布图

遗传算法使用选择操作将高适应度个体的优良特性传到下一代,并通过交叉操作和变异操作扩大解空间,在持续迭代中搜索最优个体,其中交叉概率和变异概率由实验确定。各操作具体内容如下:(1)选择操作。采用轮盘赌的方式对每代种群中的个体进行选择^[11]。(2)交叉操作。随机选择第 p 排箱区,将该排箱区在 2 个父代染色体中对应的片段互换,生成新个体。(3)变异操作。随机选择第 p 排箱区,将该排箱区内的各场桥作业量重新进行分配,得到新个体。

4 数值实验

4.1 实验设置

4.1.1 实验场景

算例包括 4 个箱区,分成 2 排,每个箱区有 20 个贝位,每个贝位有 5 个栈。有 5 个集装箱装船任务,共 40 个装船作业,随机分布于 4 个箱区。装船作业所属任务编号及其位置如图 4 所示。有 2 台岸桥分别负责箱区 1、2 和箱区 3、4 内的装船任务,即有 2 条作业线。2 排箱区分别有 3 台和 2 台场桥,集卡数目需要优化确定。岸桥、场桥操作 1 个集装箱的时间分别为 60 s 和 90 s,场桥的移动速度为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,集卡移动速度为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4.1.2 实验内容

本文设置 2 个实验方案,分别用于验证所设计模型与算法的有效性及其收敛效率,实验均通过软件 MATLAB 2012b 在 Win 10 操作系统,12 G 内存,CPU 为 2.5 GHz 的计算机上进行优化。通过控制变量法多次实验后,本文将染色体交叉概率和变异概率分别设置为 0.7 和 0.1。2 个实验具体方案如下:

实验(1):在不同集卡数目条件下,验证作业面模式对装船作业时间的影响;实验(2):在不同均衡参数条件下,验证均衡参数对算法求解效率与求解效果的影响。

4.2 实验结果

4.2.1 实验(1)结果及分析

由图 5 可知,当集卡数量 $S_{YT} < 7$ 时,集卡作业面模式具有明显优势;随着集卡数量增多,作业线模式的优势愈加凸显,并首先在 $S_{YT} = 9$ 时取得作业时间最小值,而作业面模式则在 $S_{YT} = 10$ 时取得相同最小值;当集卡数量进一步增大时,由于集卡能够提供充足的作业能力,因而 2 种作业模式下的作业时间不再变化。由此可知,在场内集卡可用资源较少时,采用作业面模式可明显提升港口作业效率。

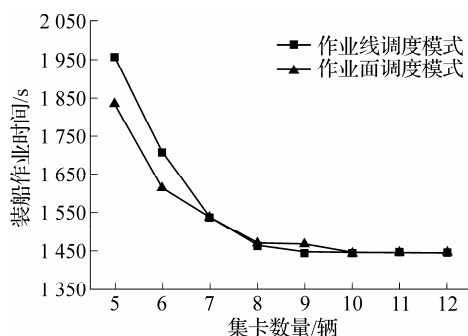
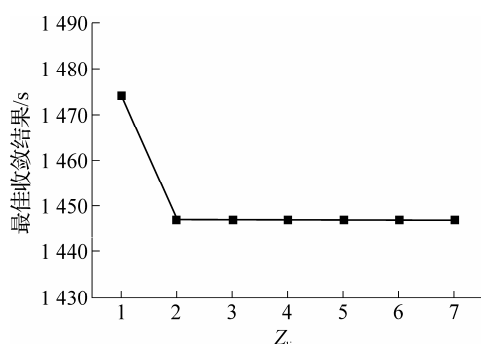
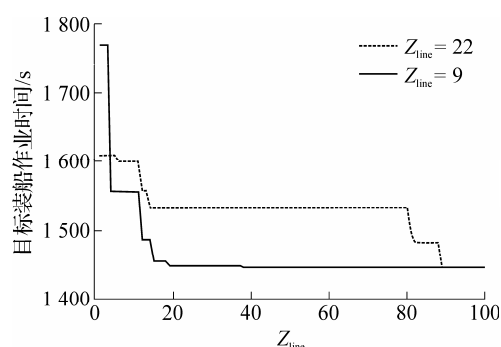


图5 不同集卡调度模式下装船作业时间对比

4.2.2 实验(2)结果及分析

根据实验(1)结果,在集卡数量为 10 辆时,集卡作业面模式作业时间最短,因此实验(2)中,将集卡数量设定为 10 辆,并得到图 6 和图 7 结果。

图 6 给出了 Z_{line} 取不同值时,采用集卡作业面模式下的装船作业时间。当 $Z_{line} = 1$ 时,装船作业

图6 Z_{line} 取不同值时的装船作业时间图7 Z_{line} 取不同值时的算法迭代次数

时间为 1474 s; 当 $Z_{line} \geq 2$ 时, 装船作业时间为 1447 s。其原因是均衡参数 Z_{line} 的取值限制了解的多样性, 即 Z_{line} 值越小, 场桥作业量分配越均衡, 而染色体的多样性也越差。因此, 当 Z_{line} 值过小时, 算法只能寻得局部最优解, 只有当参数 Z_{line} 大于某个阈值(假设为 N)后, 算法才能寻得全局最优解。此外, 场桥作业时间由作业量和行驶时间两方面因素决定, 但是场桥单次提箱需 90 s, 而移动 1 个贝位的距离仅需 4 s, 所以作业量的差异对装船作业效率的影响更大, 因而 N 值通常较小, 如本例中 N 仅为 2。但是考虑到装船作业量和场桥配置情况在不同场景下会产生变化, 为保证算法普适性, 规定 Z_{line} 值不超过各排箱区场桥最大平均作业量 δ , 本例中第 2 排箱区内各场桥作业量平均值最大, 各场桥平均有 9 个作业量, 因此本例中 $\delta = 9$, 由图 6 可知 $\delta \geq N$, 因而此时算法能够取得全局最优解。

图 7 为 $Z_{line} = 9$ 与 $Z_{line} = 22$ 时的算法收敛效率对比图。由于 $Z_{line} = 22$ 时, 算法所能生成的所有染色体均符合约束(8)式, 因而此时不需要进行染色体更新操作, 即相当于取消了染色体更新操作。从图 7 还可以看出, $Z_{line} = 9$ 时算法收敛速度明显快于 $Z_{line} = 22$ 时的算法收敛速度, $Z_{line} = 9$ 时算法收

敛迭代次数为 38 代, 所用时间为 56 s, 而 $Z_{line} = 22$ 时的算法收敛迭代次数为 89 代, 所需时间为 134 s, 因此当 $Z_{line} = \delta$ 时, 染色体更新操作加快了算法的收敛速度。通过图 6 和图 7 结果可以看出, $Z_{line} = \delta$ 时, 算法能够取得全局最优解且具有较高的收敛效率。

5 结论

结合集装箱码头装船作业的实际情况, 考虑了场桥与集卡作业过程中的紧密联系, 在多作业线工况下, 基于集卡作业面模式, 建立了以装船作业时间最短为目标的场桥与集卡联合调度优化模型。基于模型复杂性, 本文采用作业量编码方式的遗传算法为场桥分配作业量, 引入染色体更新操作, 直接将不满足场桥作业量均衡约束的染色体更新为满足约束的个体; 利用路径优化方法, 在寻找场桥最短行驶路径的同时, 避免了不满足任务优先顺序约束的无效个体生成; 最后基于先到先服务规则对集卡进行调度, 实现了集卡的多作业线间动态共享。通过算例证明, 当集卡资源较少时, 采用集卡作业面模式可明显提升堆场作业效率, 并且采用染色体更新操作能够提升算法的求解效率。

参考文献:

- [1] 陈超, 台伟力, 杨逸蓝, 等. 出口箱随机入港下的箱区选择与箱位分配协调调度[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(4):544-550.
- [2] 宓为建, 严伟, 裴道方, 等. 集装箱码头出口箱堆场分配方法: 中国, 200810171642.2[P]. 2009-11-25.
- [3] 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[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2):394-405.
- [4] LI W, WU Y, PETERING M E H, et al. Discrete time model and algorithms for container yard crane scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(1):165-172.
- [5] LIANG C J, CHEN M, GEN M, et al. A multi-objective genetic algorithm for yard crane scheduling problem with multiple work lines[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014, 25(5):1013-1024.
- [6] 丁荣涛. 基于协作能力约束的港口集卡调度优化策略[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012(8):1158-1164.

- [7] TAO J, QIU Y. A simulation optimization method for vehicles dispatching among multiple container terminals [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(7):3742-3750.
- [8] CHEN L, BOSTEL N, DEJAX P, et al. A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(1): 40-58.
- [9] CHEN L, LANGEVIN A, LU Z. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1):142-152.
- [10] CAO J X, LEE D H, CHEN J H, et al. The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2010, 46(3): 344-353.
- [11] LE M L, KOHMURA T. An improved model for the integrated yard crane and yard truck scheduling problem [J]. *Josai Journal of Business Administration*, 2013, 10(3):29-41.
- [12] 汪照, 李有明, 赵翠茹. 基于自适应遗传算法 OFDMA 资源分配[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2013, 26(1):23-27.
- [13] 何燕, 胡燕海, 毛育强, 等. 面向集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业方法[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2014, 27(1):124-128.
- [14] 周超, 胡燕海, 李建辉. 基于遗传算法的柔性作业车间柔性分批调度问题研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2015, 28(2):128-132.

Integrated scheduling optimization of yard crane and yard truck in ship-loading operation

CAO Peng-liang¹, JIANG Gui-yan^{1,2,3*}, DU Chun-cheng¹, CHEN Wei-shuai¹

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.National Traffic Management Engineering & Technology Research Centre Ningbo University Sub-centre, Ningbo 315211, China;

3.Jiangsu Province Collaborative Innovation Center for Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210000, China)

Abstract: To further reduce the berthing time of container vessels, synchronous operation of Yard Crane (YC) and Yard Truck (YT) is mainly taken into consideration of the condition on which Quay Crane (QC) works in different operating lines, whereby they can be combined and scheduled jointly. Based on this scheme, an integrated scheduling optimization model of YC and YT, which aims at minimizing the total loading task completion time, is presented by taking into account the practical constrains, such as the distraction between YCs, loading precedence and so on. According to the complexity of the mathematical model, an improved Genetic Algorithm (GA) with chromosome updating operation is developed to allocate YCs' activity volume, and a routing method is used to find the shortest driving path for YCs, and the First-Come-First-Serve rule is adopted to schedule YTs between different operating lines dynamically. In the end, the mathematical model and algorithm's effectiveness are validated by experimental results.

Key words: container terminal; loading operation; yard crane; yard truck; integrated scheduling optimization

(责任编辑 章践立)