

基于单亲遗传算法的集装箱码头岸桥作业调度

李建辉, 胡燕海*

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 分析了单船装卸作业的岸桥调度问题, 以船舶作业时间和岸桥闲置时间最短为目标函数, 建立了面向单船的集装箱码头岸桥调度和装卸船任务分配问题的多目标混合整数规划优化模型. 设计了一种基于矩阵编码的单亲遗传算法进行求解, 将实验算例与相关文献进行比较, 结果显示本研究提出的算法能得到更优解.

关键词: 岸桥调度; 混合整数规划; 单亲遗传算法; 矩阵编码

中图分类号: U169.63

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 01-0113-05

近年来, 随着集装箱港口的发展, 港口间的竞争越发激烈. 港口的自身条件, 如岸线长度、岸桥和场桥数量、堆场面积等限制了其发展空间. 要在新一轮的港口竞争中取得优势, 港口的技术条件、作业效率和管理水平将发挥重要作用. 其中岸桥利用率是码头作业的一个重要指标, 其调度方案的好坏直接影响整个码头运作的效率. 岸桥调度问题(Quay Crane Scheduling Problem, QCSP)是指给已指定的一组岸桥进行装卸排程, 一般可分为多船岸桥调度问题和单船岸桥调度问题, 笔者主要研究了单船岸桥调度问题.

当前, 国内外学者针对 QCSP 进行了大量的研究. Kim 等^[1]对 QCSP 建立一混合整数规划模型, 用分支定界法和贪婪算法对其求解, 并比较了 2 种方法. 秦天保等^[2]提出一个基于约束规划并考虑岸桥冲突、安全间距、就绪时间以及任务优先关系等因素的岸桥调度约束规划模型, 用约束规划求解. 杨明珠^[3]对单船装卸作业的岸桥调度问题进行了研究, 给出了一种改进的贪婪算法. 张亚辉等^[4]以船舶离港时间最小为目标建立了一个两阶段模型, 并证明该模型可以提高岸桥利用率. Tavakkoli 等^[5]提出多船到港情况下岸桥调度以及分配问题, 建立混合整数规划模型用遗传算法求解, 与 lingo 软

件求解对比证明算法有效性. 董良才等^[6]建立了全岸线岸桥调度与分配的混合整数动态规划模型, 采用基于段编码技术的遗传算法进行了模型优化求解. 秦进等^[7]以总费用(所有岸桥使用费用和船舶停靠费用)最小为优化目标, 建立了面向多艘船舶的集装箱码头岸桥统一调度和装卸任务分配问题的混合整数规划优化模型. 靳志宏等^[8]研究了多船动态到港下动态岸桥调度问题, 构建了非线性数学规划模型, 目标是最小化所有船舶的在港作业时间, 并用遗传算法求解. 范志强等^[9]建立了岸桥作业调度双目标混合整数规划模型, 其优化目标是最小化最大完工时间与岸桥等待时间, 并用遗传算法求解.

综上所述, 近年来针对 QCSP 的研究大致可分 2 类, 一类是以集装箱船的一个贝位作为一个装卸任务来优化调度方案; 另一类是以一组集装箱组作为一个任务, 即同一贝位的装卸箱可以分成多个任务. 国内大多数码头采用的是第 1 类调度方法. 笔者也采用第 1 类方法, 在上述研究基础上, 综合考虑岸桥实际工作情况中的约束, 以最小化岸桥作业最大完工时间和岸桥闲置时间为优化目标, 提出混合整数规划模型, 并设计了一种改进的遗传算法对模型求解, 将结果与文献[9]中算例进

收稿日期: 2013-12-03.

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

基金项目: 教育部社科规划基金(10YJA790277); 浙江省科技厅重点软科学项目(2010C35022).

第一作者: 李建辉(1990—), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 企业信息化、集装箱运输等. E-mail: airjixu23@qq.com

*通信作者: 胡燕海(1966—), 男, 浙江舟山人, 博士/教授, 主要研究方向: 企业信息化、集装箱运输等. E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn

行了比较.

1 数学模型

1.1 模型假设

结合码头岸桥作业的实际情况,对问题做如下假设:(1)将对以一整贝位为任务对象的同类岸桥作业调度问题进行研究,即一台岸桥要完成一贝位所有装卸任务,再去下一个贝位进行作业.(2)各岸桥在同一导轨上,不能相互穿越,且相邻的岸桥需要保持一定安全距离.(3)忽略岸桥移动时间.(4)岸桥的装卸速度是一致的.(5)已知船舶的集装箱配载计划.

在实际操作中,同一贝位上的装卸任务只能由一台岸桥作业,即在该岸桥完成相应贝位的作业后才移至下一贝位,故假设(1)是符合实际情况的.假设(2)保证了岸桥能够安全作业.假设(3)通常情况下装卸箱量为36箱左右的贝位需要的作业时间大概要1h,而岸桥在相邻2个贝位的移动时间不会超过1min,故岸桥移动时间可忽略不计.影响岸桥的装卸速度的不确定因素较多,但是相差基本不大,故假设速度一致.在实际操作中,船舶集装箱配载在船舶到港前已知,假设(5)成立.

1.2 参数与决策变量

1.2.1 参数

$Q=\{1,2,\dots,k,\dots,q\}$ 为岸桥集合; $\Omega=\{1,2,\dots,\text{bay}\}$ 为贝位任务集合; P_i 为贝位 i 的装卸时间($i=1,2,\dots,\text{bay}$); $T=\{1,2,\dots,t,\dots\}$ 为单位时间集合; M 为足够大的正数;相邻岸桥间距为 h 个贝位距离.

1.2.2 决策变量

t_s^i 为贝位 i 的任务作业开始时间; t_e^i 为贝位 i 的任务作业结束时间; E_k 为在同一台岸桥 k 上装卸的贝位的集合; X_{itk} 为若贝位 i 的任务在 t 时间被岸桥 k 服务时为1,否则为0; Y_{ij}^k ($i,j \in E_k$)为若岸桥 k 完成贝位 i 后紧接着开始贝位 j 的任务时为1,否则为0; Z_{ij} 为若贝位 j 的任务开始时间在贝位 i 的任务结束之后时为1,否则为0; T_k 为岸桥 k 完工时间; W_k 为岸桥 k 操作过程中的闲置时间; V 为整个调度方案的时间跨度.

1.3 调度模型

1.3.1 决策目标

(1) 尽量缩短船舶停泊时间,减少因为船舶离

港时间推迟而造成的损失.

(2) 尽量提高岸桥利用率,减少岸桥不必要的来回移动.

1.3.2 数学模型

$$\min \lambda_1 \max(T_k) + \lambda_2 \sum_{k=1}^q W_k, \quad (1)$$

s.t.,

$$W_k = T_k - \sum_{i \in E_k} P_i, \quad (2)$$

$$T_k \leq V, k \in Q, \quad (3)$$

$$\sum_{k \in Q} X_{itk} = 1, t \in T, i \in \Omega, \quad (4)$$

$$t_s^i + P_i = t_e^i, i \in \Omega, \quad (5)$$

$$t_e^i - t_s^j \leq (1 - Z_{ij})M, i, j \in \Omega, \quad (6)$$

$$Y_{ij}^k t_e^i + P_j \leq t_e^j, i, j \in \Omega, k \in Q, \quad (7)$$

$$(k_2 - k_1)(j - i)X_{itk_1}X_{jtk_2} \geq 0, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \Omega} Y_{ij}^k \leq 1, j \in \Omega, k \in Q, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \Omega} Y_{ij}^k \leq 1, i \in \Omega, k \in Q, \quad (10)$$

$$|i - j| \geq hX_{itk}X_{j(t(k+1))}, i, j \in \Omega, k \in Q, t \in T, \quad (11)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1. \quad (12)$$

在这个模型中目标函数(1)是最小化岸桥、最大完工时间和所有岸桥闲置时间二者的线性组合,鉴于这2个目标有相同的单位量纲,设定相应权重 λ_1, λ_2 .(2)式表示岸桥闲置时间的定义.约束(3)表示各个岸桥的完工时间小于等于整个调度方案的时间跨度.约束(4)表示每个贝位在任意时刻只能由一台岸桥操作.约束(5)表示每个贝位任务的作业开始时间和完成时间的关系.约束(6)表示由同一台岸桥服务的2个贝位的前后时间关系.约束(7)表示由同一个岸桥作业的紧接着的2个贝位任务的时间关系.约束(8)表示岸桥不能相互穿越进行交叉作业.约束(9)和(10)表示任意一个贝位任务最多有一个连续的前序作业和一个连续的后续作业.约束(11)表示相邻贝位在作业时要保持一定的安全距离.约束(12)对目标函数的权重做出规定,由于最大完工时间较重要,故 $\lambda_1 > \lambda_2$.

2 基于矩阵编码的单亲遗传算法

岸桥调度问题是一个NP-Hard问题,一般的数

学方法很难在有效时间内求解上述优化模型,我们设计了一种基于矩阵编码的单亲遗传算法求解该问题。

2.1 矩阵实数编码

编码是遗传算法中的重要工作之一,一个好的编码方法将给算法带来很大方便。传统一维实数编码稳定性强,但是搜索性能差,在进化过程中会产生许多非法个体,而且在处理大规模复杂问题时效率很低。我们设计了矩阵实数编码,矩阵这种二维数据结构比一维享有更大的表示空间,可以有更加多样化的遗传算子的设计,同时也使得算法具有更好的搜索能力,它能更好地反映实际问题,进行遗传操作时可以利用更多的信息,其形式如下:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

矩阵 A 中 m 表示分配给船舶的岸桥数量, n 表示任务总数量。矩阵中元素 a_{22} 表示分配给岸桥 2 的贝位任务号,空的位置用“0”补齐。矩阵编码有很大的优点:(1)能形象、直观地判断个体是否合法,即调度是否符合码头实际操作。(2)便于个体适应值的计算。(3)生成种群多样化。(4)易于将非法个体变为合法个体。(5)较一维编码稳定。

2.2 初始种群的设定

初始化的染色体是由 1 到 n 的整数随机分配给各行矩阵,矩阵染色体每行元素的前后关系表示这些基因所代表的贝位作业任务的先后顺序关系,即在矩阵某一行中前面的基因所代表的贝位任务先做,后面的基因代表的贝位任务后做。

2.3 适应值计算

我们算法中的适应值计算是基于对染色体的解释过程,主要分以下步骤:

步骤 1: 读取染色体基因。

步骤 2: 为减少岸桥不必要的移动,并确保各岸桥在同时操作过程中没有发生干扰情况,要对染色进行合法化。先对分配给每个岸桥的任务的编号从小到大排列,这样岸桥单向性的移动可以减少其不必要的移动。再让分配给各岸桥的第 1 项任务的编号从小到大排列,即染色体矩阵的第 1 列

从小到大排列,重复以上步骤直到符合大小排列要求。

步骤 3: 步骤 2 得到的染色体矩阵的第 1 列为各岸桥分配到的第 1 项任务。接着继续对染色体合法化。染色体第 2 列表示各岸桥分配到的第 2 项任务,若第 2 列任务在被作业时岸桥间发生穿越,则让作业时会发生穿越的任务对应的基因及其该基因后面的基因集体向右边挪 1 个位置,该基因原来位置用“0”替换,表示该岸桥要等待第 2 列中非零基因所代表的任务完成后才能进行它的下一个任务。后面每列以此类推,直到每一列的任务在作业中岸桥不会发生干扰。随机染色体的合法化过程如图 1 所示。

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 1 & 6 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 9 & 0 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 6 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

图 1 染色体合法化

步骤 4: 染色体合法化结束后,计算得到染色体各行执行完每个基因后的最终值,并最终得到适应值。

2.4 单亲遗传算法

传统序号编码遗传算法(Genetic Algorithm GA)的遗传操作是模仿非序号编码 GA,主要遗传算子仍为交叉算子,而序号编码 GA 的染色体不能在任意位置进行交叉,随意交叉后的染色体很可能不再代表原问题的一个解。单亲遗传算法(Partheno-Genetic Algorithm PGA)取消了传统序号编码 GA 的交叉算子,代之以仅在一条染色体上操作的基因重组等遗传算子,简化了遗传操作,提高了计算效率。本文 PGA 采用了以下几种基因重组方法:

(1) 基因多点换位: 随机选取 i 对基因交换基

因位置,如图2所示.

(2) 基因倒置: 随机选取染色体矩阵中的一列基因进行上下倒置,如图3所示.

(3) 基因单点移位: 随机选取2个基因位,把矩阵索引大的位置的基因移到索引小的位置,索引小的位置的基因以及2个基因位中间的基因按照线性编码集体向后移动一个位置,如图4所示.

(4) 基因倒置后再进行基因多点互换.

(5) 基因倒置后再进行基因单点移位.

初始染色体经过以上每一种遗传操作后,都要进行2.3节中所述的步骤2和步骤3,对染色体

进行合法化得到5个子代个体.接着对该5个子代个体进行适应值计算.比较这5个子代染色体和父代染色体的适应值,取最优作为下一代的父代染色体.

经过每一个染色体的进化后,对染色体种群进行选择.我们采取的方法是取适应值最佳的染色体替换最差的染色体,实现种群的更新和进化.

3 算例分析

假设岸桥作业能力为一个单位时间一箱,岸桥可用时间均为0时刻.遗传算法求解参数为种群

1	0	5	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0
3	4	8	9	0	0	0	0	0	0

1	0	4	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	9	0	0	0	0	0
3	5	8	10	0	0	0	0	0	0

图2 基因多点换位

1	0	5	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0
3	4	8	9	0	0	0	0	0	0

1	4	5	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0
3	0	8	9	0	0	0	0	0	0

图3 基因倒置

1	0	5	0	0	0	0	0	0	0
2	0	6	7	10	0	0	0	0	0
3	4	8	9	0	0	0	0	0	0

1	3	4	8	9	0	0	0	0	0
2	0	5	0	0	0	0	0	0	0
0	0	6	7	10	0	0	0	0	0

图4 基因单点移位

表1 双目标岸桥调度优化方案

min

岸桥 1				岸桥 2			
贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间
1	0	10	10	5	0	12	12
2	10	20	30	因安全距离约束等待 4 min			
3	30	19	49	9	16	26	42
4	49	33	82	10	42	27	69
6	82	38	120	11	69	40	109
7	120	29	149	12	109	45	154

岸桥 3				岸桥 4			
贝位	开始时间	作业时间	完成时间	贝位	开始时间	作业时间	完成时间
8	0	16	16	16	0	25	25
13	16	8	24	17	25	18	43
因安全距离约束等待 1 min				18	43	42	85
14	25	56	81	19	85	15	100
15	81	68	149	20	16	16	116

注: 最大完工时间 154 min, 岸桥闲置时间 5 min.

大小为 50, 迭代次数为 500.

本算例数据来自文献[9]中的算例 2, 采用我们设计的算法求得结果见表 1. 通过和文献[9]比较发现, 本设计的最大完工时间为 154 min, 比文献[9]最大完工时间提前了 5 min, 岸桥闲置时间 5 min, 比文献[9]中减少了 10 min.

4 结语

对单船岸桥调度问题进行了分析研究, 考虑岸桥作业不可穿越和安全距离的约束, 提出了一种基于矩阵编码的多目标单亲遗传算法, 实验数据表明能在允许运算时间内得到满意解.

本研究基于单船, 即对一艘船分配固定数量的岸桥, 然而在实际港口作业中, 岸桥资源有限, 如何实现岸桥在多船装卸作业中互相协调调度从而提高其利用率, 将是一个更有实际意义的研究课题.

参考文献:

[1] Kim K H, Park Y M. A crane scheduling method for port container terminals[J]. *European Journal of Operational*

Research, 2004, 156(3):752-768.

- [2] 秦天保, 沙梅. 基于约束规划建模求解岸桥调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(1):181-186.
- [3] 杨明珠. 单船装卸作业的岸桥调度[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(10):224-228.
- [4] 张亚辉, 梁承姬. 基于离散贝位的集装箱港口岸桥作业调度研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(5):64-69.
- [5] Tavakkoli M R, Makui A, Salahi S, et al. An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(1):241-248.
- [6] 董良才, 宓为建. 全岸线集装箱装卸桥调度模型研究[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(13):216-222.
- [7] 秦进, 倪玲霖, 王承娜, 等. 集装箱码头岸桥调度优化模型及算法[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(1):184-192.
- [8] 靳志宏, 李娜. 基于泊位计划的集装箱码头岸桥动态调度优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(3):58-64.
- [9] 范志强, 乐美龙. 最小化最大完工时间与等待时间的岸桥作业调度双目标优化及其遗传算法[J]. *系统管理学报*, 2013, 22(1):120-127.

Quay Crane Scheduling for Container Terminal Based on Partheno-genetic Algorithm

LI Jian-hui, HU Yan-hai*

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The problem of quay crane (QC) scheduling for one vessel is discussed. With the multi-objective to minimize the span of operation time of a ship and the idle time of the QCs, a mixed integer programming model is established for solving the quay crane scheduling and assignment problem. A partheno-genetic algorithm based on matrix coding is designed to obtain the optimal solution of the QC scheduling problem, which is proven for being a better solution comparing with the ones obtained from the previous study.

Key words: quay crane scheduling; mixed integer programming; partheno genetic-algorithm; matrix coding

(责任编辑 史小丽)