

面向集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业方法

何赞燕¹, 胡燕海^{2*}, 毛育强³, 吴志佩¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 3. 宁波北仑港四期码头港吉有限公司, 浙江 宁波 315800)

摘要: 针对集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业, 设计了舱位内堆垛协同策略和舱位间堆垛协同策略来完成指定贝位内集装箱的同步装卸工作; 建立了基于岸桥与集卡作业成本最小化的数学模型, 并采用序列编码的双层单亲遗传算法进行优化, 算法第一层用于求解船舶某个贝位中任一舱位内甲板下方堆垛的同步装卸最优顺序, 第二层用于搜索该贝位全部舱位中甲板上堆垛的最优顺序. 通过对不同规模的试验船舶进行算例分析, 验证了在同步装卸技术下, 证明了面向集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同作业方法的可行性和高效性.

关键词: 集装箱船; 同步同贝装卸; 堆垛协同; 单亲遗传算法

中图分类号: U691

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 01-0124-05

同步装卸策略的提出对于提高码头装卸设备效率, 减少作业成本有积极意义. 在集装箱码头同贝同步装卸中, 曾庆成等人^[1]以贝位为单位进行贝位间的协同装卸, 打破传统作业路的单程装卸模式; He 等人^[2-3]以舱位为单位进行同步装卸方法研究, 通过优化计算, 使装卸效率较传统单程装卸提高 27%. 在此基础上, 笔者进一步研究同贝同步装卸策略, 以堆垛为最小协同单位, 设计了舱位内堆垛协同策略和舱位间堆垛协同策略, 实现配载计划内 1 个贝位的全部集装箱装卸, 减小岸桥与集卡作业成本. 并通过算例分析, 验证了模型与算法的可行性与有效性.

1 堆垛协同作业问题描述

根据图 1 所示的船舶舱位布局, 假设 $\{h_1, h_2, \dots, h_n\} \in H$ 为 1 个贝位中所有舱位的表示; $\{s^a, s_1^b, s_2^b, \dots, s_n^b\} \in S$ 为任一舱位中的堆垛表示, 其中, s^a 为甲板上所有堆垛, s_n^b 为甲板下第 n 个堆垛, 表示为 stack n .

1.1 舱位内堆垛协同策略

先考虑 1 个舱位内甲板下方的集装箱, 堆放以

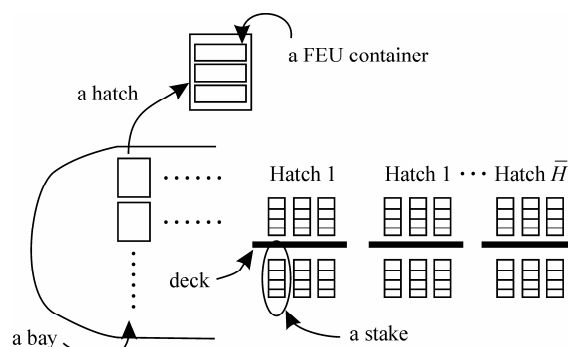


图 1 集装箱船 1 个贝位结构布局

堆垛为单位, 岸桥先卸完 tack 1, 从 stack 2 开始, 实行同步装卸, 岸桥从 stack 2 卸下个集装箱后, 从集卡上将 stack 1 待装载集装箱吊起装船. 因此通过优化可获得每个舱位甲板下最优堆垛装卸顺序.

1.2 舱位间堆垛协同策略

在舱位内堆垛协同优化之后, 对每个舱位生成参数 $s^a = \{n_h^u, n_h^l\}, \forall h \in H$. n_h^u 为舱位 h 中甲板上所有堆垛待卸集装箱和卸载仓储盖的集合; n_h^l 为舱位 h 中甲板上所有堆垛待装集装箱和装载仓储盖的集合. 装卸方法: 卸完 n_{h1}^u , 同步装卸实施装载 n_{h1}^l 并卸载 n_{h2}^u , 依此类推. 通过优化, 可以获得每

收稿日期: 2013-01-17.

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

基金项目: 教育部规划基金项目 (10YJA790277); 浙江省科技厅重点软科学项目 (2010C35022); 宁波市自然科学基金 (2013A610285).

第一作者: 何赞燕 (1988—), 女, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 集装箱装运、智慧物流. E-mail: jessy.he@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、智慧物流. E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn

个舱位最优装卸顺序.

综合以上策略, 同贝同步装卸方法为卸完 n_h^u , 甲板下方堆垛进行舱位内同步装卸, n_h^l 与 n_h^u 进行舱位间堆垛同步装卸, 依此类推, 完成同贝位全部集装箱作业(图 2).

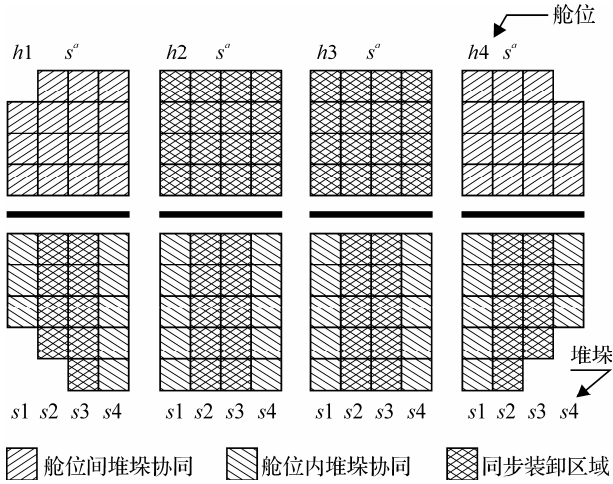


图 2 舱位协同作业

2 数学模型

当建立面向集装箱船同贝同步装卸的堆垛协同问题中的数学模型时, 对参数作如下假设: $h \in H = \{1, 2, \dots, \bar{H}\}$ 表示 1 个贝位中的舱位; $s \in S = \{1, 2, \dots, \bar{S}\}$ 表示 1 个舱位中的堆垛; $i \in I = \{1, 2, \dots, \bar{I}\}$ 为集卡集合; C_{hs} 表示舱位 h 中堆垛 s 的集装箱装卸完成时间; V_i 为集卡 i 完成任务的时间; V_{hs} 为集卡完成 1 个舱位内一堆垛集装箱装卸的时间; L_{hs} 为完成第舱位 h 中堆垛 s 中待装集装箱的装载时间; U_{hs} 为完成第舱位 h 中堆垛 s 中待卸集装箱的卸载时间; U_h 为完成第舱位 h 中待卸集装箱的卸载时间; L_h 为完成第舱位 h 中待装集装箱的装载时间; n_s^u 表示舱位 s 中待卸集装箱量; n_s^l 表示舱位 s 中待装集装箱量; u 为完成船舶上个集装箱卸载的集卡与岸桥平均作业时间和; l 为完成船舶下个集装箱装载的集卡与岸桥平均作业时间和; m 是实现 1 个行程内同步装卸的集卡与岸桥的平均作业时间和; M 为 1 个足够大的正整数.

在决策变量设定中, 设 $X_{ss'}^h$ 和 $x^{hh'}$ 是表示卸船顺序的决策变量, $X_{ss'}^h = 1$ 时表示在舱位 h 中, s' 在 s 之后完成卸船作业, 否则为 0; $x^{hh'} = 1$ 表示舱位 h' 在 h 之后卸载, 否则为 0; $Y_{ss'}^h$ 和 $y^{hh'}$ 是表示装船

顺序的决策变量, $Y_{ss'}^h = 1$ 时表示在舱位 h 中, s' 在 s 之后完成装船作业, 否则为 0; $y^{hh'} = 1$ 表示舱位 h' 在 h 之后装载, 否则为 0; Z_{hs} 其值为 1 表示舱位 h 中的堆垛 s 在仓储盖上方, 其值为 0 表示舱位 h 中的堆垛 s 在舱内.

目标函数:

$$f = \min(\gamma \times \max_{h \in H, s \in S} C_{hs} + \varepsilon \times \max_{i \in I} V_i), \quad (1)$$

$$\sum_{s \in S} (C_{hs} + V_{hs}) = \sum_{s \in S} u n_s^u Z_{hs} + \sum_{s \in S} l n_s^l Z_{hs} + \min\{n_s^u(1 - Z_{hs}), n_s^l(1 - Z_{hs})\} m + |n_s^u(1 - Z_{hs}) - n_s^l(1 - Z_{hs})| (u + l), \forall h \in H, \quad (2)$$

$$V_{hs} \geq C_{hs}, \quad (3)$$

$$C_{hs} \geq L_{hs}, \quad (4)$$

$$\sum_{s' \in S} X_{ss'}^h \leq 1, \forall s \in S, \forall h \in H, \quad (5)$$

$$\sum_{s' \in S} Y_{ss'}^h \leq 1, \forall s \in S, \forall h \in H, \quad (6)$$

$$\sum_{h' \in H} x^{hh'} \leq 1, \forall h \in H, \quad (7)$$

$$\sum_{h' \in H} y^{hh'} \leq 1, \forall h \in H, \quad (8)$$

$$L_{hs} \geq U_{hs}, \quad (9)$$

$$L_{hs} - U_{hs} \geq u n_s^u, \quad (10)$$

$$L_h - U_h \geq u \sum_{s \in S} n_s^u, \quad (11)$$

$$U_{hs'} - U_{hs} + M(1 - X_{ss'}^h) \geq u n_s^u, \quad (12)$$

$$L_{hs'} - L_{hs} + M(1 - Y_{ss'}^h) \geq l n_s^l, \quad (13)$$

$$L_h - L_{h'} + M y^{hh'} \geq l \sum_{s \in S} n_s^l, \quad (14)$$

$$U_h - U_{h'} + M x^{hh'} \geq u \sum_{s \in S} n_s^u, \quad (15)$$

$$X_{ss'}^h, x^{hh'}, Y_{ss'}^h, y^{hh'}, Z_{hs} = \{0, 1\}, \quad (16)$$

其中, (1)式为目标函数, 最小化岸桥与集卡作业成本, 其中 γ 为岸桥开后后单位时间作业费用; ε 为集卡单位运行时间作业费用; (2)式约束了同一舱位仓储盖上下堆垛能否进行同步装卸; (3)式表示集卡完成时间大于等于岸桥作业完成时间; (4)式表示装卸桥作业完成时间大于等于所有装船作业完成时间; (5)式和(6)式为同一个舱位中堆垛装卸作业的顺序约束; (7)式和(8)式为不同舱位间堆垛作业的顺序约束; (9)式~(11)式约束了集装箱装船作业必须在卸船作业完成后进行; (12)式和(13)式定义了同一舱位中堆垛的同步装卸顺序; (14)式和(15)式定义了不同舱位间堆垛的同步装卸顺序;

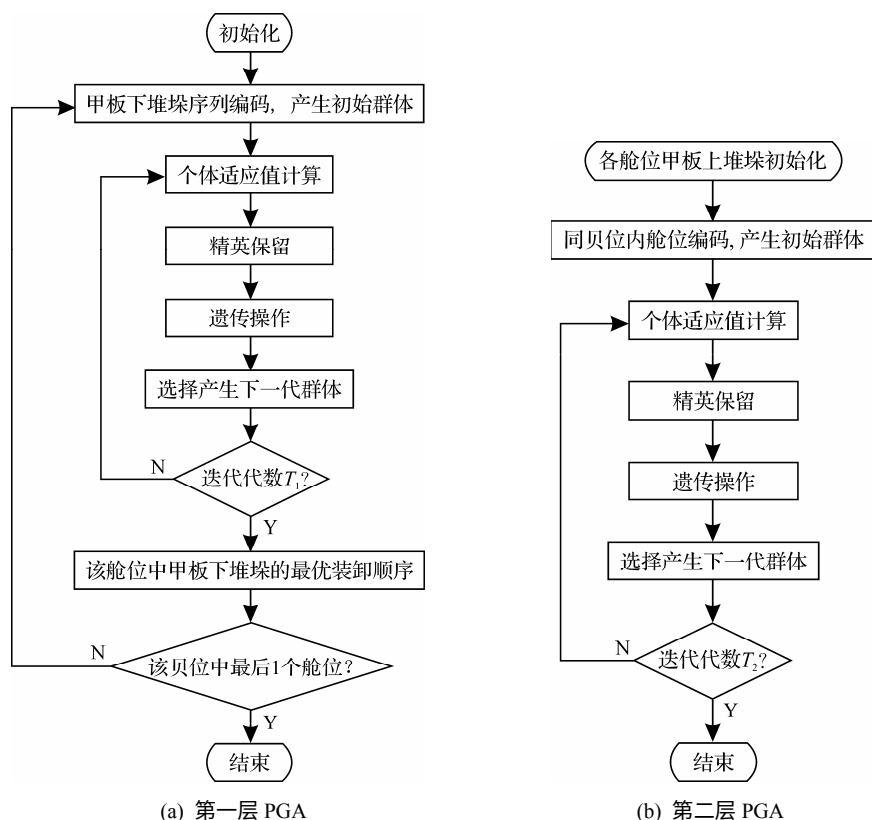


图3 DPGA 流程

(16)式定义了各个布尔变量。

3 双层单亲遗传算法求解

根据所求问题的特征,采用序列编码的双层单亲遗传算法对模型进行求解。笔者采用舱位内堆垛协同策略和舱位间堆垛协同策略来完成某一指定贝位内集装箱的同步装卸工作。在单亲遗传算法的基础上,为搜索最优解,笔者设计采用序列编码的双层单亲遗传算法(Double-level Partheno-Genetic Algorithm, DPGA),求船舶任一贝位中集装箱装卸顺序,使得集卡与岸桥作业成本最小。第一层算法用于求解船舶某一贝位中任一舱位内甲板下方堆垛的同步装卸最优顺序;第二层算法用于搜索该贝位全部舱位中甲板上堆垛的最优顺序。最后综合双层算法,求解同贝位内堆垛的最优装卸序列,以及优化后的岸桥与集卡作业最小成本。算法的主要过程如图3所示。

3.1 基于舱位内堆垛序号、舱位序号的编码

采用传统遗传算法的二进制编码,不易进行交叉变异操作,且会产生大量非可行解,故根据具

体问题灵活编码。笔者设计的双层单亲遗传算法采用基于舱位内堆垛序号、舱位序号的编码方法,将第一层 PGA 染色体定义为 1 个舱位中甲板下装卸堆垛号序列表示卸载 stack 1 → 同步装载 stack 1 卸载 stack 5 → 同步装载 stack 5 卸载... → 装载 stack 2, (图 4(a)); 将第二层 PGA 的染色体定义为 1 个贝位中仅包含甲板上堆垛待处理的舱位号序列 (图 4(b))。在 Matlab 中均以不重复的行向量来表示, $S = \{1, 5, \dots, 2\}, H = \{3, 4, \dots, 1\}$ 。

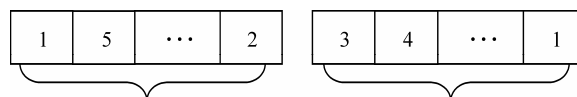


图4 染色体编码

3.2 遗传操作

PGA 遗传算子有别与 TGA(Traditional Genetic Algorithm)的交叉与变异算子,因为直接在一条父代染色上进行遗传操作,通常采用的是基因重组和突变算子。该问题的同位基因数 $g_c = 1$,不存在基因突变算子^[4],故只须采用基因重组操作产生子代染色体。基因重组算子常见的有倒位、移位、换

表 1 不同规模船舶同贝同步装卸数据对比

试验样本 ^[5]						总作业成本 ⁽⁵⁾ /RMB			费用节省率/%	
编号	规模/TEU	舱位 ⁽¹⁾	集装箱 ⁽²⁾	堆垛 ⁽³⁾	集装箱 ⁽⁴⁾	f^*	f_1	f_2	$(f^*-f_1)/f^*$	$(f^*-f_2)/f^*$
1	14000	6	30	4	10	19263	13247	12097	31.23	37.20
2	8500	5	24	4	10	14631	10496.7	9461.3	28.26	35.34
3	5500	4	20	4	9	9856.3	7321.4	6432.1	25.72	34.74

注: (1)表示船舶上 1 个贝位中的的舱位数; (2)表示 1 个舱位甲板上计划装卸集装箱量上限值, 单位 FEU; (3)表示 1 个舱位甲板下排布的堆垛数; (4)表示每个堆垛计划装卸集装箱量上限值, 单位 FEU; (5)其中 f^* 为传统单程装卸集卡与岸桥的总作业成本, f_1 为舱位协同下的总成本, f_2 为本文堆垛协同下的总成本。

位算子. 该问题编码染色体的长度较小, 故采用单点换位算子. 以 $p_e = 0.5$ 的换位概率交换 1 条染色体中随机 2 位基因. 其具体操作如 $parent = (1\ 5\ 3\ 4\ 2)$, 经基因换位产生 $son = (1\ 2\ 3\ 4\ 5)$.

3.3 适应度值计算

单亲遗传算法根据每条染色体适应值的大小进行概率计算, 通常适应值高的染色体被选入下一代的几率也大. 文中数学模型中以目标函数 f 求最小成本, 选择时, 目标函数值越小, 则入选下一代的概率反而越大. 所以调整适应度函数 $fitness$, 令 $fitness = 1 / f (f > 0)$, 使得染色体适应值大小与其被选入下一代概率一致.

3.4 基于精英保留的选择操作

采用单亲遗传算法进行优化计算时, 为使结果收敛到最优值, 在轮盘赌选择操作中引入精英保留策略, 将每一代最优个体直接复制到下一代. 其操作程序为:

将父代 n 条染色体按 $fitness(n)$ 降序排序, 将最大值对应的染色体 $opt(parant)$ 复制给下一代;

以 $p_e = 0.5$ 的换位概率对 n 条染色体进行基因换位操作, 产生新群体与原群体组成 $2n$ 条染色体;

采用轮盘赌在形成的 $2n$ 条染色体中选择出 $n-1$ 条染色体, 与 $opt(parant)$ 组成新群体, 规模为 n .

4 算例分析

根据集装箱船规模的不断发展, 算例设置 3 个试验样本来表示不同规模的集装箱船每个贝位的舱位数、每个舱位中的堆垛数以及最大集装箱容量存在. 假设算例满足条件: (1)由于不同规模船型结构有所区别, 特别是 4000TEU 以下, 船舶差异较大, 故试验船舶以 5000TEU 以上的超巴拿马船型

的集装箱船作分析; (2)由北仑港实际作业成本可推算出岸桥单位时间作业费用 $\gamma = 2.19\text{ RMB}\cdot\text{min}^{-1}$, 集卡运行单位时间作业费用 $\varepsilon = 0.62\text{ RMB}\cdot\text{min}^{-1}$; (3)集卡完成 1 个单程装卸的平均时间 $t_v^D = t_v^L = 12\text{ min}$, 完成 1 个同步装卸的平均时间 $t_v^S = 15\text{ min}$; 岸桥完成 1 个单程装卸的平均时间 $t_q^D = t_q^L = 2\text{ min}$, 完成 1 个同步装卸的平均时间 $t_q^S = 2.5\text{ min}$; (4)集卡在岸桥、场桥处装卸顺畅, 等待时间可忽略不计; (5)每个舱位中每个堆垛计划装卸集装箱量在容量范围内由程序随机产生.

Matlab 编程计算结果见表 1. 由表 1 可知, 针对 3 艘试验船舶, 采用堆垛协同策略的成本节省率优于舱位协同的成本节省率. 且船舶的规模越大, 这种优势越能得到体现.

采用 DPGA 求解算例时, 可以获得同贝位各个舱位堆垛的装卸序列, 以试验样本 3 为例, 软件随机产生的装卸集装箱量数据见表 2.

表 2 5500TEU 试验船舶 1 个贝位装卸集装箱量 FEU

舱位号 装卸货		舱位位置				
		甲板上	甲板下	甲板下	甲板下	甲板下
		方 Sa	Stack1	Stack2	Stack3	Stack4
1	卸货	18	5	9	8	9
	装货	8	7	3	7	1
2	卸货	9	4	3	7	6
	装货	20	6	3	6	6
3	卸货	1	1	5	7	3
	装货	20	4	3	8	7
4	卸货	4	2	2	4	5
	装货	14	8	6	8	5

根据 Matlab 计算结果, 该贝位中集装箱最优装卸序列见表 3. 由表 3 可知, 针对随机试验贝位, Matlab 随机产生范围内的参数, 优化后的最优同

步装卸序列为: (1)舱位 3, 甲板下堆垛 1、堆垛 3、堆垛 2、堆垛 4; (2)舱位 4, 甲板下堆垛 2、堆垛 3、堆垛 4、堆垛 1; (3)舱位 2, 甲板下堆垛 1、堆垛 3、堆垛 4、堆垛 2; (4)舱位 1, 甲板下堆垛 3、堆垛 2、堆垛 1、堆垛 4.

表 3 1 个贝位中最优装卸序列显示

	舱位			
	3	4	2	1
堆垛	1	2	1	3
	3	3	3	2
	2	4	4	1
	4	1	2	4

5 结语

在研究同贝同步装卸问题中, 提出了舱位内堆垛协同策略和舱位间堆垛协同策略, 建立了基于岸桥集卡集成作业成本最小化的数学模型, 设计了模型求解的双层单亲遗传算法. 算例分析结果显示: 对于船舶规模为 5500TEU、8500TEU、14000TEU 的集装箱船, 采用本文的方法较传统单程装卸, 成本节省分别为 34.74%、35.34%、37.20%, 成本节省率优于舱位协同的作业方法; 且船舶的

规模越大, 这种优势越能得到体现. 采用 DPGA 求解算例时, 可以获得同贝位各个舱位堆垛的装卸序列.

在本文研究的基础上, 接下来的研究方向将考虑异贝同步装卸的调度方法, 进而实现整条集装箱船的优化装卸.

致谢 感谢宁波北仑港四期码头港吉有限公司提供的调研机会.

参考文献:

- [1] 曾庆成, 杨忠振, 陆靖. 集装箱码头同贝同步装卸调度模型与算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1):88-93.
- [2] He Yunyan, Hu Yanhai. Synchronized loading and unloading containers method based on simultaneous hatches operations[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 201:939-942.
- [3] 何赞燕, 胡燕海. 基于舱位协同作业的集装箱同步装卸方法[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2012, 25(3):105-108.
- [4] 李茂军, 童调生. 用单亲遗传算法求解有序组合优化问题[J]. 系统工程与电子技术, 1998(10):58-61.
- [5] 张忠林. 大型集装箱船总体布置及结构设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004:3-9.

Simultaneous Ship-stacks Operations for Container Ship Using One-bay Synchronized Loading and Unloading Method

HE Yun-yan¹, HU Yan-hai^{2*}, MAO Yu-qiang³, WU Zhi-pei¹

(1.Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

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

3. Ningbo Beilun Port of Ningbo Gangji Co. Ltd, Ningbo 315800, China)

Abstract: Simultaneous ship-stacks operations using one-bay synchronized loading and unloading method for container ship are proposed. Intra-hatch simultaneous ship-stacks operations and inter-hatch simultaneous ship-stacks operations are designed to carry out the loading and unloading work in the same bay. An optimization model of minimizing quay crane and vehicles' total cost is established. Sequence coded double-level partheno-genetic algorithm is employed to optimize the model. The feasibility and efficiency of the proposed method are validated by computational analysis.

Key words: container ship; one-bay synchronized loading and unloading method; simultaneous ship-stacks operations; partheno-genetic algorithm

(责任编辑 章践立)