

最小化集装箱运输成本的配载优化

郑斐峰 蒋 娟 梅启煌

(东华大学旭日工商管理学院 上海 200051)

摘 要 随着长江沿岸港口集装箱运输的快速发展,配载计划的制定已成为制约集装箱运输发展的一个主要因素。以航行中最小化的翻箱费用和堆栈使用费用为优化目标,在船舶安全航行的前提下,以船舶装载稳定性作为约束条件建立混合整数规划模型。通过 CPLEX、遗传算法和贪婪算法对长江沿岸中小型集装箱船舶配载进行实验对比分析,结果证明了所提模型的有效性。同时,应用两种算法对大规模集装箱配载情形进行对比求解,通过仿真实验证明了遗传算法的高效性,与实际运输经验操作相比,其将运输成本平均降低了 24.73%。这说明本文所提出的模型对于降低航线运输成本和制定长江沿岸港口配载计划具有一定的指导意义。

关键词 配载优化,多港口,混合整数规划,遗传算法,贪婪算法

中图法分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.036

Study on Stowage Optimization in Minimum Container Transportation Cost

ZHENG Fei-feng JIANG Juan MEI Qi-huang

(Glorious Sun School of Business and Management,Donghua University,Shanghai 200051,China)

Abstract With the rapid development of container transportation along the Yangtze River,the stowage planning has become an important issue in the development of container transportation. Aiming at the minimum shifting cost and stack usage cost during the voyage,this paper established a mixed integer programming model that considers the ship safety and loading stability constraints. Then CPLEX,genetic algorithm and greedy algorithm were designed to analyze the stowage planning of small and medium sized container ships along the Yangtze River,and the validity of the proposed model was proved. Besides,the two proposed algorithms were applied to solve the large-scale container loading problem,and both of them can quickly get reasonable solutions. Compared with the industry experience,the experiments prove that the proposed model can reduce 24.73% on average for the transportation cost of the route and is of certain guiding significance to the container transportation along the Yangtze River.

Keywords Stowage optimization,Multiple ports,Mixed integer programming,Genetic algorithm,Greedy algorithm

1 引言

随着 21 世纪集装箱运输行业的快速发展,我国长江沿岸各大港口的吞吐量取得了大幅度增长。在以“共建国际航运新生态”为主题的 2016 年国际海运年会上,来自全球航运产业链的各方代表在上海共同探讨了共建国际航运新生态的发展路径。目前,我国的港口货物吞吐量、集装箱吞吐量已经连续十多年稳居世界第一^[1]。2015 年,长江沿岸港口的集装箱吞吐量达到 460.88 万 TEU,增长了 16.33%;2016 年集装箱吞吐量达到接近 500 万 TEU,同比增长 9.07%。

随着集装箱运输业务的快速发展,配载计划的制定逐渐成为影响集装箱运输的主要因素。在运输过程中,集装箱的翻箱操作不仅极大地影响了港口的工作效率,而且也会给船运公司造成很大的经济损失。尤其是在如今船运公司之间的竞争日益激烈的情况下,制定合适的配载计划,使得航线过程

中的运输成本达到最小,也成为集装箱运输的一个重要环节。

在多港口集装箱运输过程中,不同港口的翻箱操作所产生的翻箱费用不同。通过对港口的实地调研和查阅相关资料得知,在上海港翻箱一次的成本大约为 40 元,而在新加坡港翻箱一次的成本大约是 200 美元。不同港口的翻箱费用有着明显的区别,因此,合理的配载计划可以有效减少集装箱运输过程中产生的翻箱费用,从而降低集装箱的运输成本。

根据船舶运输行业的装载规则^[2],在多港口运输过程中,为了避免船舶在后续港口行驶过程出现超载的情况,也为了当前港口尽可能地少使用贝位中的堆栈,规定每使用一个堆栈便产生 10 个单位成本。

在已有文献中,尚未发现以运输费用为优化目标的研究。本文以总航线翻箱费用和堆栈使用成本之和最小为优化目标,以集装箱的装载规则和重量限制作为约束条件,建立混合整数规划模型。利用 CPLEX 对该模型进行求解,验证了模

到稿日期:2018-04-02 返修日期:2018-07-13 本文受国家自然科学基金(71771048),上海市人才发展资金资助项目(201471),中央高校基本科研业务专项资金项目(2232018H-07)资助。

郑斐峰(1976—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为现代生产与服务调度、集装箱港口物流优化,E-mail:ffzheng@dhu.edu.cn(通信作者);蒋娟(1995—),女,硕士生,主要研究方向为交通物流优化;梅启煌(1992—),男,硕士生,主要研究方向为集装箱港口物流优化。

型的有效性,并通过遗传算法和贪婪算法对大型集装箱船舶的配载情况进行仿真分析,结果表明其能在较短的时间内对大型集装箱配载得出较好的方案。本文工作对降低我国长江沿岸船舶的运输成本和提高港口的工作效率降低有一定的指导作用。

2 国内外研究综述

目前已有不少学者和科研人员对集装箱的配载优化进行了研究。其中,Avriel 等^[3]最早使用线性规划的方法对集装箱配载问题进行描述;Ding 等^[4]对多港口集装箱配载问题进行了研究;张维英等^[5]为集装箱配载问题的研究指明了方向。

2.1 单港口集装箱配载情形

Imai 等^[6]针对单港口集装箱船舶配载问题,以船舶装载稳定性和堆场集装箱最小翻箱数量为优化目标,在满足船舶配载规则的基础上,考虑船舶的重心、吃水差等因素,建立双目标的混合整数规划模型。仿真实验证明:提出的模型对求解实际问题有很大的指导意义。Delgado 等^[7]研究了集装箱船舶贝位的快速配载问题,以最小化集装箱的装载成本为优化目标,综合考虑不同大小、不同型号的集装箱,在满足集装箱配载规则的基础上,建立约束规划与线性规划模型,运用最先进的求解器和建模技术。实验证明:该方法能够在 1s 之内迅速解决 236 个现实实例中 90% 的实例,对于求解这类配载问题具有很好的效果。Tierney 等^[8]根据 Avriel 等^[9]提出的集装箱配载,将这一 NP-完全问题转化为多项式时间可解问题,并证明了集装箱配载优化问题的求解复杂度。Monaco 等^[10]研究了港口终端集装箱船舶的配载问题,以优化岸桥等设备的操作为主,以最小化装载时间为目标,建立 0-1 整数规划模型,并设计两阶段的启发式算法,最后通过仿真实验证明了此方法的有效性及其高效性。Ambrosino 等^[11]针对此类问题,将船舶配载转化为贝位装载问题,通过设计分解启发式算法,以船舶最小化装载时间为优化目标,建立 0-1 线性规划模型,并利用设计的方法对此进行求解,取得了较好的效果。

2.2 多港口集装箱配载情形

以上研究都是关于单港口集装箱的配载问题,而在实际船舶运输过程中,优化多港口集装箱运输问题十分必要。Ambrosino 等^[12]在主贝位配载的基础上建立了混合整数规划模型,以最小化重新处理的集装箱重量和岸桥的工作效率为优化目标,并在此基础上设计了启发式算法。仿真实验证明了该方法能够为装载 18000 TEUs 的船舶制定出合适的配载方案。Preston 等^[13]研究多港口集装箱配载问题,以最小化船舶的周转时间为优化目标,建立集装箱的箱位分配模型,并设计遗传算法对该问题进行求解。仿真实验证明了此方法能有效地减少岸桥分配到泊位的使用数量。Wilson 等^[14]针对多港口的配载优化问题,设计出了两阶段的启发式算法,并通过计算机自动进行求解,从而得出合理的配载方案。在每阶段应用配载的启发式规则,仿真实验证明其能在一定的时间内得出合理的配载方案。Ding 等^[15]研究中国中小型港口的集装箱码头的工作效率问题。首先通过数据分析快速得出影响集装箱港口工作效率的因素,并利用这些因素建立 Tobit 回归分析模型。实证表明:日照和连云港两个港口具有较高的工作效率;此外,注册资本等因素与目标是正相关的,而港

口操作次数等因素具有负相关效应。褚晓津^[16]通过研究船舶稳定性的多港口集装箱配载问题,以航线中的最大倒箱数量为优化目标,将船舶稳定性、安全性等作为约束条件建立线性规划模型,最后通过实例证明了此方法的有效性。段成华等^[17]对单贝多港集装箱配载问题进行了相关研究,以最小化航线中的阻塞箱为优化目标,建立 0-1 线性规划模型,并通过实例证明了模型的有效性,对港口的实际操作具有一定的指导意义。

除此之外,杨鹏等^[18]对集装箱港口码头场桥的调度问题进行了相关研究,梁承姬等^[19]也对岸桥与泊位之间的调度问题进行了研究。

以上这些研究都是以集装箱在港口的翻箱数量最小或者船舶的停港时间最小为优化目标。本文在多港口集装箱配载的基础上,以航线过程中总费用最小为目标建立混合整数规划模型。通过 CPLEX 对模型进行求解,验证了模型的有效性。通过对算法进行对比分析并对大规模配载情形进行求解表明,所提模型能快速得出较好的配载方案,对降低船运公司集装箱的运输成本以及提高港口的运输效率具有一定的指导意义。

3 问题描述及模型建立

3.1 问题描述

根据船舶的结构,可以将集装箱船舶看作是由多个相同的贝位组成的,而每个贝位又是由多个相同的箱位构成的。在本文的研究过程中,鉴于贝位在船舶配载过程中具有的特殊性及普遍性,本文研究单个贝位在航线过程中的配载情况。在多港口航行过程中,船舶贝位中箱位的位置是由一个二维的坐标构成的。假设每个贝位是由 R 层 C 列个箱位组成,其中层数从上到下的编号依次是 $1, \dots, R$;列数从左到右的编号依次是 $1, \dots, C$ 。因此每个集装箱在贝位中的位置可以由 $(c, r) (1 \leq c \leq C, 1 \leq r \leq R)$ 来表示,每个贝位中最多可以装载 $Q = R * C$ 个集装箱。假设船舶在航行过程中一共要经过 T 个港口,在初始港口,船舶上不存在集装箱,只进行装载操作。船舶根据航线依次经过 $2, 3, \dots, T-1$ 个港口,进行装载和卸载两种操作。在港口 $t (1 < t < T)$,若集装箱 i 的目的港口是当前港口 t ,而与集装箱 i 位于同列的集装箱 j 的目的港口大于 t ,并且装载在集装箱 i 的上面,则卸载集装箱 i 时,首先要卸载集装箱 j ,在这一过程中便会产生一次翻箱成本。每使用一个堆栈便产生 α 的单位成本。在船舶到达最后一个港口时,所有的集装箱都要被卸载下来。在航行过程中,为了保持船舶运输的稳定性与安全性,贝位中每列装载的总集装箱数量不能超过 R ,每列装载的最大重量不能超过一个规定的承载重量 W ,并且在每次的装卸过程中必须时刻满足重箱在下轻箱在上的装载规则^[20]。

本文研究基于以下几点假设:

- 1)所有的集装箱都是 20 ft 标准箱;
- 2)只考虑贝位内部的翻箱操作,不考虑贝位之间的翻箱操作;
- 3)在船舶出发前,已知后续港口集装箱运输的信息;
- 4)假设集装箱的重量分为 3 个等级,如食品、服装等轻工业产品的重量等级在等级 1 和等级 2 之间随机变化,钢材原

料等的重量等级在等级 2 和等级 3 之间随机变化;

5)不考虑集装箱的翻箱时间对集装箱翻箱费用的影响。

3.2 模型建立

针对多港口航行过程中运输费用最少的配载优化问题,建立如下的混合整数规划模型。

1)索引

t :港口的序号;

i, j :集装箱的序号;

c :贝位中列数的序号,从左到右依次是 1, 2, 3, ..., C ;

r :贝位中层数的序号,从上到下依次是 1, 2, 3, ..., R 。

2)参数

T :航线中港口的集合, $t=1, 2, 3, \dots, T$;

C :每个贝位中的总列数;

R :贝位中每列的总层数;

N : T 个港口中装载的集装箱的集合, $i, j=1, 2, 3, \dots, N$;

w_i :第 i 个集装箱的重量;

s_i :向船舶中装载的第 i 个集装箱的出发港口;

d_i :从船舶中卸载的第 i 个集装箱的目的港口;

D_t :在第 t 个港口目标箱的集合, $D_t = \{i | d_i = t\} \cup \{i | s_i = t\}$;

U_t :在第 t 个港口非目标箱的集合, $U_t = \{i | s_i < t < d_i\}$;

W :贝位中每一列允许的集装箱的最大载重量;

α :贝位中使用一个堆栈所需要的成本;

C_t :在第 t 个港口,翻箱一次所需要的成本;

M :一个充分大的正整数。

3)决策变量

$X_{i,c,r}^t$:当船舶进入第 t 个港口时,如果第 i 个集装箱被装载在 (c, r) 箱位上,则 $X_{i,c,r}^t = 1$, 否则等于 0;

$Y_{i,c,r}^t$:当船舶离开第 t 个港口时,如果第 i 个集装箱被装载在 (c, r) 箱位上,则 $Y_{i,c,r}^t = 1$, 否则等于 0;

$Z_{i,c,r}^t$:第 i 个集装箱装载在箱位 (c, r) 上时,在第 t 个港口被翻了一次,则 $Z_{i,c,r}^t = 1$, 否则等于 0;

e_c :若贝位中第 c 个堆栈被占用,则 $e_c = 1$, 否则等于 0。

本文的优化目标分别为:1) $\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_t Z_{i,c,r}^t$, 即航线中的最小翻箱费用;2) $\alpha \sum_{c=1}^C e_c$, 即堆栈使用成本。因此,建立如下的优化模型:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_t Z_{i,c,r}^t + \alpha \sum_{c=1}^C e_c \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{c=1}^C \sum_{r=1}^R Y_{i,c,r}^t = 0, \forall i, t < s_i \quad (2)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{r=1}^R Y_{i,c,r}^t = 0, \forall i, t \geq d_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i Y_{i,c,r}^t \leq W, \forall c, t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R Y_{i,c,r}^t \leq R, \forall c, t \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_{i,c,r}^t \leq 1, \forall c, t, r \quad (6)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{r=1}^R Y_{i,c,r}^t = 1, \forall i, s_i \leq t \leq d_i - 1 \quad (7)$$

$$Y_{i,c,r}^t \leq \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^N Y_{j,c,r+1}^t, \forall i \neq j, c, t, r \leq R-1 \quad (8)$$

$$w_i Y_{i,c,r}^t - \sum_{j=1}^N w_j Y_{j,c,r+1}^t \leq 0, \forall i \neq j, c, t, r \leq R-1 \quad (9)$$

$$X_{i,c,r}^{t+1} = Y_{i,c,r}^t, \forall i, c, r, t \leq T-1 \quad (10)$$

$$Y_{i,c,r}^t = 0, \forall i, c, r \quad (11)$$

$$Z_{i,c,r}^t \geq X_{i,c,r}^t - Y_{i,c,r}^t, \forall c, t, r, i \in U_t \quad (12)$$

$$Z_{i,c,r_1}^t \geq 1 - M * (2 - X_{i,c,r_1}^t - X_{j,c,r_2}^t), \forall c, t, i \in U_t, \quad (13)$$

$$Z_{j,c,r_1}^t \geq X_{j,c,r_1}^t + Y_{j,c,r_1}^t + X_{i,c,r_2}^t + Y_{i,c,r_2}^t - 2, \forall c \leq C, \quad (14)$$

$$e_c - X_{i,c,r}^t \geq 0, \forall i \leq N, c \leq C, r \leq R, t \leq T \quad (15)$$

其中:

$$X_{i,c,r}^t, Y_{i,c,r}^t, Z_{i,c,r}^t, e_c \in \{0, 1\} \quad (16)$$

$$i \leq N, c \leq C, r \leq R, t \leq T \quad (17)$$

目标函数(1)表示航行过程中的总运输成本最小。约束条件(2)–(3)表示若集装箱的出发港口大于当前港口或者目的港口小于当前港口,则该集装箱一定不会装载在贝位中。约束条件(4)表示贝位中每列装载的最大总重量不能超过 W 。约束条件(5)表示每列装载的最大层数不能超过 R 。约束条件(6)表示在任意港口,每个箱位最多只能装载一个集装箱。约束条件(7)表示航行过程中,每个集装箱能且仅能占用一个箱位。约束条件(8)表示集装箱不能悬空堆放。约束条件(9)表示任意时刻均要满足重箱在下、轻箱在上的堆放规则。约束条件(10)表示集装箱在离开港口时所装载的位置应该与刚到达下一港口时所装载的位置相同。约束条件(11)表示在到达最后一个港口时,所有的集装箱都应该被卸载。约束条件(12)表示若同一个集装箱在进入港口与离开港口时所装载的位置不同,则会产生一次翻箱操作。约束条件(13)表示目标箱 j 装载在同列的非目标箱 i 的下面,在卸载目标箱 j 时,对非目标箱 i 必定会产生一次翻箱。约束条件(14)表示非目标箱 i 装载在同列的非目标箱 j 的下面,若非目标箱 i 产生了一次翻箱,则非目标箱 j 必定也会产生一次翻箱。约束条件(15)表示若有集装箱装载在第 c 列,则该堆栈一定被使用了。约束条件(16)–(17)表示各决策变量与参数的范围。

4 算法设计

4.1 遗传算法

遗传算法是根据达尔文的生物进化理论提出的一种模拟生物进化过程来寻找最优解的方法。对于这类组合优化问题的求解,遗传算法已经取得了不少研究成果。文中应用遗传算法对集装箱配载优化问题进行求解,并提出以港口数量为基因组的编码方式。具体算法设计方式分为以下几个方面。

1)染色体的编码设计

文中设计以航线中港口数量为基因段的编码方式,每条染色体代表航线的一个配载计划,分别由 $T-1$ 个基因片段组成。每个基因片段包含 Q 个基因,即染色体的长度为 $Q * (T-1)$ 。每个片段中的基因数字表示在该港口装载的集装箱的编号,因此每个基因表示不同的集装箱装载在不同的箱位上。当基因片段中的基因全部为非 0 时,则表示在港口该贝位中的集装箱达到了满载的情况;在非满载的情况下,没有

装载的集装箱的箱位用基因 0 来表示。由于集装箱的重量不同,可根据重箱在下、轻箱在上的原则对集装箱在同列中的装载层数进行调整。图 1 给出染色体的编码方式,该染色体由 3 个基因片段组成,每个基因片段包含 4 个基因,即两行两列的 4 个箱位。图中第 1 个基因片段中的数字 3 表示在港口 1 第 3 号集装箱装载在第 4 个箱位上,在港口 2 中不存在第 3 号集装箱,说明在港口 2 第 3 号集装箱已经被卸载了。染色体中的数字 0 表示在港口 3,第 3 个箱位上没有装载集装箱。若集装箱在两个港口中装载在不同的箱位上,则说明该集装箱在港口产生了一次翻箱操作,也即产生了一次翻箱成本。贝位中的两个堆栈都进行了使用,则会产生两个 α 成本。

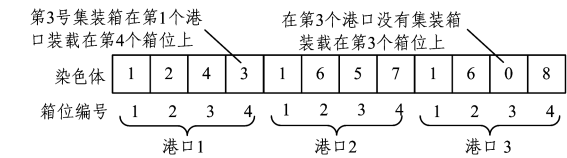


图 1 染色体的编码方式

Fig. 1 Representation of chromosome

2) 初始种群的生成

假设航线过程中一共需要运输 $N(N \leq R * C * (T-1))$ 个集装箱,并且每个港口运输的集装箱数量(需要装载的集装箱数量+贝位中已经存在的集装箱数量)不会超过贝位的总箱位数量。在初始港口,将起始港口为港口 1 的集装箱随机分配到贝位中,如图 1 所示,编号为 1-4 的集装箱随机地装载在贝位的 4 个箱位中;在港口 2 时,由于 2-4 号(目的港口为 2 号港口)集装箱已被卸载,5-7 号(起始港口为 2 号港口)集装箱需要装载运输,因此将 1,5,6,7 号集装箱随机地装载到 4 个箱位中;在没有达到满载时,用数字 0 表示,如图 1 中的第 3 个基因片段所示;由于每个集装箱都有一个特定的重量,因此贝位中相同列的集装箱的装载顺序也是固定的。以此类推,直到完成 $T-1$ 个基因片段的装载,满足种群规模为止。最终,随机生成的每条完整染色体便是航线的一种配载方案。

3) 适应度函数

在遗传算法的设计中,适应度函数的值越大表明个体的适应性越好,也越容易被选中。在配载问题的研究过程中,本文以航线中最小的总成本作为适应度函数。航线中总成本越小表示适应度越大,个体越容易被选择成为交叉或变异操作的父代染色体。运输总成本的表达式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^T \sum_{c=1}^N C_i Z_{i,c}^T + \alpha \sum_{c=1}^C e_c$$

因此,适应度函数为:

$$F(x) = \frac{1}{f(x)}$$

4) 交叉和变异操作

本文采用的交叉操作为双点交叉,分为两个阶段:第一阶段以一定的概率选择出两条待交叉的染色体,再从已选择的染色体的多个基因片段中随机选择一个基因片段;第二阶段从已选择的基因片段中随机选择两个交叉点,将两条染色体的交叉点对应的基因进行交换,形成子代染色体。交叉的过程如图 2 所示。



图 2 染色体的交叉操作

Fig. 2 Crossover of chromosome

同样地,变异也是采用同一个基因片段中的基因进行变异操作。首先以一定的概率选择待变异的染色体,随机选择变异的基因片段,再在此基因片段中随机选择两个基因变异点,并将两个选中的基因进行位置互换,交换前后即为集装箱装载在不同的箱位上。变异的过程如图 3 所示。

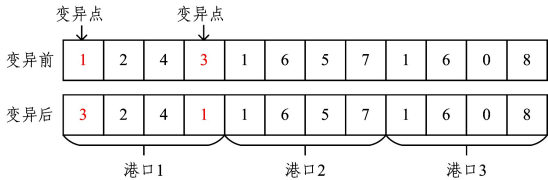


图 3 染色体的变异操作

Fig. 3 Mutation of chromosome

5) 可行性检验及基因修复

在经过交叉和变异操作之后,需要对生成的子代染色体进行可行性检验。可行性的判断规则如下:一个集装箱只能占用一个箱位;贝位中每列的集装箱的总重量不能超过 W ,并且每列要满足重箱在下、轻箱在上的装载规则。

基因修复过程如下:对于同一个集装箱装载在多个箱位上的情况,如图 4 所示,在港口 2 中,1 号集装箱同时装载在了 1 号和 3 号箱位上,造成 6 号集装箱未进行装载操作;并且 1 号和 7 号集装箱的总重量超过了堆栈总重量 W 。因此基因修复后应将 6 号集装箱进行装载,以保证每列的集装箱总重量不超过 W 。

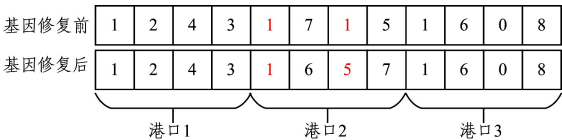


图 4 基因修复过程

Fig. 4 Gene repairing process

本文以进化代数作为终止判别条件,若迭代超过规定的次数,则停止迭代。最后输出最优染色体即最终的配载方案,以及目标函数值即配载方案所对应的翻箱成本与堆栈使用成本之和。

4.2 贪婪算法

贪婪算法是指在求解过程中,始终以当前的收益最大化或成本最小化为目标做出最好的选择,即不从整体上进行优化求得最优解,只根据当前状态做出最优选择。针对本文的最小运输成本问题,设计出如下贪婪算法规则:

首先,将每个港口所有需要运输的集装箱按照重量排序。根据重箱优先装载的顺序,从底层开始,沿贝位左侧向右侧装载,若集装箱的重量相同,则离目的港口远的集装箱优先装

载,装载完最底层后再装载上面一层,直到完全装载完该港口所有的集装箱。

其次,若装载过程中超过堆栈的总重量约束,则将该列中最高层集装箱与其他较轻的集装箱交换,或者将该集装箱装载到其他堆栈中,以满足堆栈最大重量的限制。如图 5 所示,假设航线中包含 4 个港口,1—5 号集装箱在初始港口进行装载操作,6 号集装箱的初始港口为港口 2,7—8 号集装箱的初始港口为港口 3。由于 5 号集装箱装载在第一列中违反了堆栈重量的限制(每列中装载的重量不能超过 8),因此将 5 号集装箱装载在第二列中,并且始终满足重箱在下、轻箱在上的装载规则。

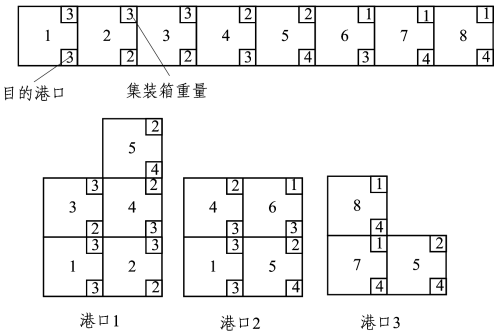


图 5 贪婪算法装载过程示意图

Fig. 5 Loading process diagram of greedy algorithm

最终,到达下一港口时,卸载目的港口为当前港口的集装箱,并按照重箱在下、轻箱在上的规则装载后续港口集装箱,直到船舶到达最终港口,计算航线总运输成本。

最终,到达下一港口时,卸载目的港口为当前港口的集装箱,并按照重箱在下、轻箱在上的规则装载后续港口集装箱,直到船舶到达最终港口,计算航线总运输成本。

5 实例分析

在集装箱运输行业中,长江沿岸各大港口发展迅速,但是船舶的配载仍然是制约集装箱运输发展的一大因素。本文假

设船舶在航行过程中经过 8 个不同的港口,在初始港口时,船舶上不存在集装箱,只进行装载操作。在经过港口 2—7 时既有装载操作也有卸载操作,并最终到达港口 8,在港口 8 船舶上的所有集装箱都应该被卸载下来。假设集装箱的重量分为 1,2,3 共 3 个等级,等级越高表示集装箱的重量越大,即等级为 1 的表示轻箱,等级为 2 的表示中型箱,等级为 3 的表示重箱。为了保证航行过程中的安全,大规模运输中每个堆栈最高可装载 10 层。航行经过 8 个港口,每个港口翻箱所产生的费用分别为:30,15,40,50,80,50,70,25。贝位中每占用一个堆栈需要付出 10 个单位的成本。

仿真实验过程中,通过不断增加贝位的行数和列数,在装载率为 50% 的前提下,增加集装箱的运输规模。通过 CPLEX 对所建立的模型在小规模、中规模以及大规模的集装箱配载情况下进行求解,并将 CPLEX 与遗传算法和贪婪算法进行对比,其中每个组合中 CPLEX、遗传算法与贪婪算法的取值、求解时间和 Gap 值均是经过 5 次求解之后所得的平均值。遗传算法的初始种群为 100 代。经过选择、交叉和变异等操作之后,迭代次数超过 200 则停止迭代,输出最优的配载方案。

表 1 对比分析了 CPLEX、遗传算法和贪婪算法对小规模集装箱运输的成本。其中,CPLEX,GA,GM 所在列的数值分别表示对应算法所输出的目标值。由表中数据可知,在小规模集装箱运输过程中,贪婪算法的平均 Gap 值为 914%,这表明仅通过港口工作人员的操作经验难以达到最优的装载情形,因此设计出遗传算法进行分析。通过比较,遗传算法在小规模集装箱运输过程中的平均 Gap 值为 13.05%,能取得与 CPLEX 的最优解相近的满意解。随着运输箱数量的不断增加,CPLEX 的求解时间成倍增长。当贝位中集装箱的运输量超过 70TEU 时,遗传算法的 Gap 值基本上都在 15% 以下,同时遗传算法的求解时间要远少于 CPLEX 的求解时间,表明遗传算法对此类问题可以取得较好的求解效果。

表 1 CPLEX、遗传算法与贪婪算法在小规模运输下的成本对比分析

Table 1 Cost comparison analysis of CPLEX,genetic algorithm and greedy algorithm in small-scale transportation

运输箱量	重箱率/%	CPLEX	Time/s	GA	Time/s	Gap/%	GM	Time/s	Gap/%
42	30	49	97	55	194	12.24	526	0.05	973.47
	60	28	92	31	203	10.71	469	0.05	1575.00
	90	30	91	36	198	20.00	424	0.05	1313.33
56	30	42	231	49	257	16.67	465	0.05	1007.14
	60	39	242	45	243	15.38	714	0.05	1730.77
	90	48	215	57	278	18.75	598	0.05	1145.83
70	30	64	581	72	335	12.50	607	0.05	848.44
	60	68	586	77	338	13.24	871	0.05	1180.88
	90	76	592	86	341	13.16	656	0.05	763.16
88	30	124	1461	146	428	17.74	1159	0.05	834.68
	60	119	1457	132	431	10.92	1084	0.05	810.92
	90	127	1446	144	427	13.39	1393	0.05	996.85
105	30	475	2904	512	534	7.79	1235	0.05	160.00
	60	484	2892	517	526	6.82	1427	0.05	194.83
	90	491	2911	524	537	6.72	1355	0.05	175.97
平均						13.07			914.09

注:遗传算法的 Gap=(GA-CPLEX)/CPLEX * 100%,贪婪算法的 Gap=(GM-CPLEX)/CPLEX * 100%

对于不断增加集装箱的运输数量使得运输规模达到中型集装箱船运输的问题,CPLEX 难以在较短的时间内求出精确

解。因此规定当运输数量达到 120TEU 及以上时,将 CPLEX 的求解时间设定为两小时,得出最小成本的上界值,并与遗传

算法和贪婪算法求得的结果进行比较分析。

表 2 是 CPLEX 与遗传算法和贪婪算法在中等规模运输下的成本对比分析结果。从表中的数据可知,当贝位集装箱的运输规模达到 172 TEU 时,*Gap* 开始出现负数,表明 CPLEX 在两小时内求得的配载方案逐渐比遗传算法差,而遗

传算法的求解时间要远少于 CPLEX 的求解时间,这表明遗传算法在中型集装箱运输过程中逐渐比 CPLEX 的求解效果好。虽然贪婪算法的求解时间很短,但是其所得的配载方案与 CPLEX 相比,*Gap* 达到 32.14%,与上界值相差较大,这进一步说明了遗传算法求解的有效性。

表 2 CPLEX、遗传算法与贪婪算法在中等运输规模下的成本对比分析
Table 2 Cost comparison analysis of CPLEX,genetic algorithm and greedy algorithm in medium-scale transportation

运输箱量	重箱率/%	CPLEX	Time/s	GA	Time/s	Gap/%	GM	Time/s	Gap/%
126	30	1053	7200	1250	1217	18.71	1709	0.05	62.30
	60	1083	7200	1271	1308	17.36	1874	0.05	73.04
	90	1119	7200	1292	1347	15.46	1680	0.05	50.13
147	30	1296	7200	1453	1630	12.11	1631	0.05	25.85
	60	1316	7200	1469	1643	11.63	1618	0.05	22.95
	90	1278	7200	1443	1639	12.91	1527	0.05	19.48
172	30	1879	7200	1894	1841	0.80	2294	0.1	22.09
	60	1910	7200	1871	1834	-2.04	2444	0.1	27.96
	90	1893	7200	1906	1867	0.69	2245	0.1	18.59
196	30	2170	7200	1987	2058	-8.43	2572	0.1	18.53
	60	2214	7200	2094	2116	-5.42	2564	0.1	15.81
	90	2148	7200	2033	2077	-5.35	2770	0.1	28.96
平均						5.70	32.14		

注:遗传算法的 $Gap=(GA-CPLEX)/CPLEX \times 100\%$,贪婪算法的 $Gap=(GM-CPLEX)/CPLEX \times 100\%$

通过增加集装箱的运输规模,使得运输箱量达到 224 TEU 以上时,CPLEX 不能在有效时间内求解出配载方案。因此,对遗传算法与贪婪算法在多港口集装箱大规模运输情况下进行分析。在不同装载量以及重箱率的情况下,对航线中集装箱的大规模运输进行仿真分析,结果如表 3 所列。

表 3 遗传算法与贪婪算法在大规模运输下的成本对比
Table 3 Cost comparison between genetic algorithm and greedy algorithm in large-scale transportation

运输箱量	重箱率/%	GM	Time/s	GA	Time/s	Gap/%
224	30	2852	0.1	2219	2011	-22.19
	60	3023	0.1	2322	2054	-23.19
	90	2863	0.1	2276	2048	-20.50
252	30	3123	0.1	2071	2236	-33.69
	60	3099	0.1	1976	2257	-36.24
	90	3263	0.1	2189	2219	-32.91
284	30	3847	0.1	3084	2394	-19.83
	60	3936	0.1	3146	2411	-20.07
	90	3629	0.1	3031	2406	-16.48
315	30	4204	0.1	3212	2713	-23.60
	60	4022	0.1	3101	2644	-22.90
	90	3400	0.1	3007	2610	-11.56
350	30	4338	0.1	3457	2903	-20.31
	60	4706	0.1	3321	2886	-29.43
	90	4533	0.1	3389	2924	-25.24
385	30	5216	0.1	3561	3016	-31.73
	60	4887	0.1	3417	3114	-30.08
	90	5036	0.1	3588	3077	-28.75
420	30	5451	0.1	3991	3241	-26.78
	60	4810	0.1	4076	3285	-15.26
	90	5438	0.1	4189	3236	-22.97
455	30	6071	0.1	4636	3486	-23.64
	60	5863	0.1	4233	3394	-27.80
	90	6394	0.1	4571	3465	-28.51
490	30	6232	0.1	4516	3761	-27.54
	60	6253	0.1	4371	3714	-30.10
	90	6181	0.1	4573	3687	-26.02
525	30	6837	0.1	5347	3921	-21.79
	60	6578	0.1	5149	3957	-21.72
	90	6988	0.1	5516	4016	-21.06
平均						-24.73

注: $Gap=(GA-GM)/GM \times 100\%$

在长江沿岸港口运输过程中,制定合理的配载计划能够有效地降低集装箱运输过程中的运输成本,同时提高港口的工作效率。本文通过建立混合整数规划模型并设计算法,针对集装箱配载问题进行仿真分析,在降低集装箱运输成本的同时,提高了港口的工作效率。

结束语 文中对多港口集装箱配载优化问题进行了研究,将贝位装载与岸桥操作和集装箱重量装载作为约束条件,建立混合整数规划模型。通过将 CPLEX、贪婪算法与遗传算法进行实验对比分析,证明了所提模型的有效性。同时针对大规模集装箱配载情况,所提模型仍能在较短的时间内得出合理的配载方案,降低了航线过程中的运输成本,对集装箱配载计划的制定具有一定的指导意义。

在港口运输过程中,船舶公司之间的竞争也日益加剧,时间和经济效益都逐渐成为制约航运公司发展的因素。因此,考虑集装箱类型、贝位翻箱等多种因素的影响,以及最小停港时间和集装箱运输费用的关系等多目标优化问题,是基于此研究的拓展,也是作者今后的主要研究方向。

参 考 文 献

[1] BAI Q H. The new ecology of international shipping,co-building,sharing and symbiosis—2016 International Maritime Conference Annual Review[J]. Zhong Guo Shui Yun,2016,37(11): 8-9. (in Chinese)
白庆虹. 国际航运新生态:共建、共享、共生 ——2016 国际海运年会观点扫描[J]. 中国水运,2016,37(11):8-9.

[2] PARRENO F,PACINO D,ALVAREZ-VALDES R. A GRASP algorithm for the container stowage slot planning problem[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review,2016,94:141-157.

[3] AVRIEL M,PENN M,SHPIRER N,et al. Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts[J]. Annals of Operations Research,1998,76:55-71.

[4] DING D,CHOU M C. Stowage planning for container ships:a

heuristic algorithm to reduce the number of shifts [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246(1): 242-249.

[5] ZHANG W Y, LIN Y, JI Z S. A Model of Bay Layout for Containership Based on the Least Shifting[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(2): 199-204. (in Chinese)
张维英, 林焰, 纪卓尚. 集装箱船全航线 Bay 位排箱优化模型[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(2): 199-204.

[6] IMAI A, SASAKI K, NISHIMURA E, et al. Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(2): 373-389.

[7] DELGADO A, JENSEN R M, JANSTRUP K, et al. A Constraint Programming model for fast optimal stowage of container vessel bays [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 220(1): 251-261.

[8] TIERNEY K, PACINO D, JENSEN R M. On the complexity of container stowage planning problems [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2014, 169(2): 225-230.

[9] AVRIEL M, PENN M, SHPIRER N. Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2000, 103(1-3): 271-279.

[10] MONACO M F, SAMMARRA M, SORRENTINO G. The terminal-oriented ship stowage planning problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 239(1): 256-265.

[11] AMBROSINO D, SCIOMACHEN A, TANFANI E. A decomposition heuristics for the container ship stowage problem[J]. *Journal of Heuristics*, 2006, 12(3): 211-233.

[12] AMBROSINO D, PAOLUCCI M, SCIOMACHEN A. Computational evaluation of a MIP model for multi-port stowage planning problems[J]. *Soft Computing*, 2015, 21(7): 1753-1763.

[13] PRESTON P, KOZAN E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals [J]. *Computers & Operations Research*, 2001, 28(10): 983-995.

[14] WILSON I D, ROACH P A. Container Stowage Planning: A Methodology for Generating Computerised Solutions[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51(11): 1248-1255.

[15] DING Z Y, JO G S, WANG Y, et al. The Relative Efficiency of Container Terminals in Small and Medium-Sized Ports in China [J]. *Asian Journal of Shipping & Logistics*, 2015, 31(2): 231-251.

[16] CHU X J. On Stowage Planning for Multi-port Container Transportation Based on Stability Constraint[J]. *Logistics Engineering and Management*, 2014, 36(11): 83-84. (in Chinese)
褚晓津. 船舶稳定性的多港口集装箱配载问题[J]. *物流工程与管理*, 2014, 36(11): 83-84.

[17] DUAN C H, GUO X. A Stowage Planning Model for Single Bay and Multi-port Based on Integer Programming [J]. *Computer Aided Engineering*, 2004, 13(3): 9-13. (in Chinese)
段成华, 郭旭. 基于整数规划的单贝多港 (SBMP) 配载模型研究[J]. *计算机辅助工程*, 2004, 13(3): 9-13.

[18] YANG P, CHAI X Y, SUN J Q. Research on problem of yard crane cooperative schedule[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(1): 231-233. (in Chinese)
杨鹏, 柴小燕, 孙俊清. 集装箱码头场桥协同调度研究[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(1): 231-233.

[19] LIANG J, WU Y. Simultaneous berth and quay crane scheduling under uncertainty environments in container terminals[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(7): 212-219. (in Chinese)
梁承姬, 吴宇. 不确定环境下集装箱码头泊位与岸桥联合调度[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(7): 212-219.

[20] AMBROSINO D, SCIOMACHEN A, TAFANI E. Stowing a containership: the master bay plan problem[J]. *Transportation Research Part A Policy & Practice*, 2004, 38(2): 81-99.