

文章编号:1671-1637(2014)05-0059-09

# 集装箱船舶全航线配载优化模型与改进遗传算法

祝慧灵, 计明军

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**以集装箱船舶稳性、强度、载荷为约束条件,以全航线倒箱量最小和吃水差最优为目标函数,建立了集装箱船舶全航线多目标配载优化模型。利用启发式算法获得初始可行解,利用改进的遗传算法进行优化,并用1 841 TEU、3开口的集装箱船舶进行实例验证。计算结果表明:与传统遗传算法相比,改进的遗传算法能在1.967 s内求得全航线上5个挂靠港口的配载计划,并能求得5个港口的满意解;在求得的满意解中,船舶倒箱量均为0,吃水差的绝对值分别为0.003 5、0.000 8、0.109 7、0.001 1、0.371 2 m,均在船舶行驶的合理范围0~0.5 m内;对于不同挂靠港数量的其他航线,改进的遗传算法能在5 s内快速获得合理的配载计划。可见,优化模型与改进的遗传算法可行。

**关键词:**集装箱运输;航线配载;遗传算法;全航线;吃水差

**中图分类号:**U695.2

**文献标志码:**A

## Optimal model and improved genetic algorithm of containership stowage on full route

ZHU Hui-ling, JI Ming-jun

(School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** The stability, strength and load of containership were taken as constraint conditions, the minimum shift and the optimal trim on full route were taken as objective functions, and the multi-objective optimal model of containership stowage on full route was established. The initial feasible solution was obtained by using heuristic algorithm and was optimized by using improved genetic algorithm, and the example verification was carried out on the practical containership with capacity of 1 841 TEU and 3 hatches. Calculation result shows that by using the improved genetic algorithm, the stowage plans of 5 call ports can be obtained within 1.967 s, and the reasonable solution in each port can be obtained compared with traditional genetic algorithm. In the obtained reasonable solutions, all the shift amounts are 0, and the absolute values of trim are 0.003 5, 0.000 8, 0.109 7, 0.001 1 and 0.371 2 m respectively, which are within a reasonable range between 0 to 0.5 m. For the other routes of call ports with different amounts, the reasonable stowage plan can be highly achieved within 5 s by using the improved genetic algorithm. So, the optimal model and improved genetic algorithm are feasible. 5 tabs, 8 figs, 19 refs.

**Key words:** container transportation; route stowage; genetic algorithm; full route; trim

**Author resumes:** ZHU Hui-ling(1989-), female, doctoral student, +86-411-84729330, zh1891015good@

收稿日期:2014-05-07

基金项目:国家自然科学基金项目(71072081)

作者简介:祝慧灵(1989-),女,江苏南通人,大连海事大学工学博士研究生,从事航运系统规划研究。

导师简介:计明军(1973-),男,内蒙古赤峰人,大连海事大学教授,工学博士。

163.com; JI Ming-jun(1973-), male, professor, PhD, +86-411-84729330, jmj@dlmu.edu.cn.

## 0 引 言

集装箱船舶全航线配载主要解决在不同港口装卸时,在遵循配载的基本原则与保证船舶稳性、强度、吃水差等力学原理的基础上,确定待装集装箱在船舶中的具体箱位,编制既定集装箱船舶的装卸计划。它既要满足船舶稳性、强度、吃水差等特定要求,又要满足码头生产组织和装卸效率要求,同时还要保证货运质量,是集装箱营运过程中的核心环节。

由于配载问题约束较多,而且船舶的装载能力在不断增大,因此,需要系统地分析约束条件下的集装箱船舶配载问题。Avriel 等论证了船舶配载问题是个多约束大规模的 NP-hard 问题,建立了 0-1 数学规划模型,并用搜索算法自动生成配载计划<sup>[1-2]</sup>; Wilson 等运用组合优化原理,通过启发式和禁忌搜索算法计算集装箱的装载位置<sup>[3-5]</sup>; Imai 等以堆场装船倒箱量最小和船舶的稳性因素为目标建立了整数规划模型,并利用遗传算法求解<sup>[6]</sup>,但该模型没有考虑舱盖对配载的影响; Tierney 等从压舱盖倒箱问题的角度分析了集装箱船舶配载计划的复杂性<sup>[7]</sup>; Delgado 等将船舶配载计划分解为主配载计划和箱位计划 2 个子问题,而主配载计划的计算结果将作为箱位计划的输入数据<sup>[8-12]</sup>; Sciomachen 等结合了三维装箱问题,提出了启发式算法解决主配载计划问题<sup>[13]</sup>; Monaco 等结合堆场和运输业务,提出了基于码头的配载计划问题,并设计了整数规划和两阶段启发式算法进行求解<sup>[14]</sup>; 孙晓雅等提出了集装箱船舶多港贝位排箱的优化方法,对于后续港口装载状态未知的情形,建立了贝位重心位置和横倾力矩最优的多目标优化数学模型,并通过离散粒子群算法进行求解,给出粒子位置的矩阵表达形式,并通过交叉和局部搜索策略对粒子位置进行更新<sup>[15]</sup>。

为了增强算法的实用性,逐渐有学者将遗传算法应用到船舶配载领域,曾庆成等建立了同贝同步装卸调度模型,实现装卸桥在同一贝位内同时进行装船与卸船作业,并设计了双层遗传算法的求解模型<sup>[16]</sup>; Dubrovsky 等提出了用紧凑编码技术来设计适用于集装箱船配载问题的遗传算法<sup>[17]</sup>,该方法最大的特点是减少了迭代次数; 靳志宏等建立了基于现实约束的混合整数规划模型,提出了基于预分配

策略的启发式算法与遗传算法相结合的交互式混合算法,并用 VB 程序实现了配载方案的可视化<sup>[18]</sup>; 孙俊清等提出兼顾船舶稳定性和倒箱次数的 0-1 规划模型,设计了基因组编码的遗传进化算法,使船舶在安全稳定性限制的前提下,获得最小倒箱量<sup>[19]</sup>。

以上对船舶配载问题的研究较少考虑船舶稳性、强度、吃水差等力学原理,基本都是从纯数学的角度进行研究,并且没有结合全航线挂靠港的特点,仅是以单个港口为研究对象,局限在某条航线的某个港口来设计配载方案。在此基础上,本文以全航线的倒箱次数最小和吃水差最优作为目标,以船舶稳性、强度等为约束条件构建全航线多目标配载模型,运用改进的遗传算法求解模型。

## 1 问题描述

集装箱船舶全航线配载是指在某条确定的航线运营中,考虑所有待装集装箱的装卸港口,确定所有待装集装箱在船舶中的具体位置,编制出各港口的船舶装卸计划。

在集装箱全航线配载中,根据当前挂靠港口的集装箱信息与船舶贝位信息,确定各个集装箱在船舶的位置,使每一航次在保证船舶安全的条件下尽可能避免或减少中途港倒箱,最终达到提高装卸效率的目的,因此,本文将船舶倒箱量作为一个求解目标,要使倒箱量最小。

针对挂靠 A、B、C、…、X(图 1)的某条确定的航线制定配载计划,如何获得各个挂靠港口最合理的配载计划是要解决的问题。要获得配载计划,集装箱在船舶的位置至关重要,需要兼顾目的港口、质量、规格、货种等不同因素。配载的过程还要确保集装箱在船上分布的合理性,否则可能造成装船后,船舶由于不满足稳性、强度、吃水差等力学原理导致船舶不适航问题。在各种力学原理中,吃水差是主要指标,合理范围的吃水差可以减少航行时的阻力,提高航行效率,节约运营成本,因此,本文将吃水差作为另一个求解目标,使吃水差尽量接近船舶设计的最佳值。

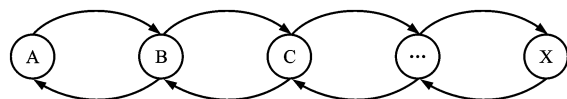


图 1 港口与航线

Fig. 1 Ports and routings

## 2 模型建立

### 2.1 基本假设

考虑船舶运营特点,本文作如下假设。

(1)该航次各个挂靠港口待装集装箱的信息在配载前已知,包括起始港口、目的港口、货种、数量、尺寸、质量等。

(2)货流是单向流动的(图2)。

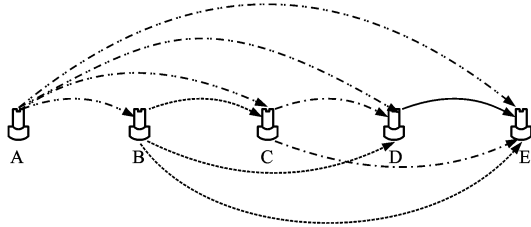


图2 货物流向

Fig.2 Freight flow direction

在港口A,装载目的港口为B、C、D、E的集装箱;在港口B,装载目的港口为C、D、E的集装箱;依次类推,最终在港口E,卸空所有的集装箱。货物运输矩阵为上三角矩阵,即

$$Z = \begin{bmatrix} z_{01} & z_{02} & z_{03} & z_{04} \\ 0 & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\ 0 & 0 & z_{23} & z_{24} \\ 0 & 0 & 0 & z_{34} \end{bmatrix}$$

式中:下标0~4分别表示港口A~E; $z_{01}$ 为港口A到港口B的货流量; $z_{02}$ 为港口A到港口C的货流量; $z_{03}$ 为港口A到港口D的货流量; $z_{04}$ 为港口A到港口E的货流量;其他同理。

(3)不考虑危险品箱和冷藏箱等一切特殊箱,只考虑5.89 m×2.35 m×2.39 m的标准集装箱。

(4)该航次任一挂靠港口待装箱数量都不存在超过船舶最大装载量的情形。

(5)该航线任一挂靠港口都是先卸载,后装载。

(6)船舶为3开口舱盖:在2个5.89 m×

2.35 m×2.39 m的箱位上,使用3个纵向箱型舱盖,将舱内箱位分成左中右3部分,每个区域可以看成一个小舱。

### 2.2 箱位的分块表示

假设(6)中提到贝位的舱盖下部分被3个舱盖分成了左中右3个小舱,这对于挂港较多的集装箱船舶来说,为分港配载提供了便利。用这种方法可以使不同目的港集装箱混装,细化配载单元,更有利于船舶稳性、吃水差、强度等性能的控制。由于舱盖上下集装箱箱位众多,为了方便计算,引入集装箱箱位块的概念,即以舱盖为标准把集装箱贝位分成6个部分,在装载时可以分开考虑,方便计算。图3描述了集装箱船舶贝位的分块情形。

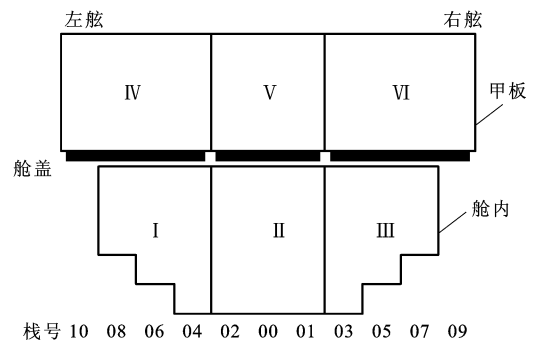


图3 贝位划分

Fig.3 Bay partition

集装箱船舶的箱位块是三维的,每块由2个连续相连的奇数贝位组成,而2个奇数贝位组成1个偶数贝位,为表示方便,设计变量 $t^{(n,p,q)}$ 为1个集装箱船舶箱位块,其中 $n$ 为舱位编号( $n$ 为偶数); $p=1,2,3$ ,表示从左到右的排列的舱盖编号; $q$ 为0表示舱盖下的箱位块, $q$ 为1表示舱盖上的箱位块。如 $t^{(2,2,0)}$ 表示贝位02中间舱盖下的箱位块,而贝位02由贝位01和贝位03组成,见图4虚线框。

### 2.3 参数与变量定义

令 $U^{(n,p,q)}$ 为船舶箱位块( $n,p,q$ )中总的箱位数; $W_n$ 为船舶第 $n$ 舱所能承受的最大装载质量;

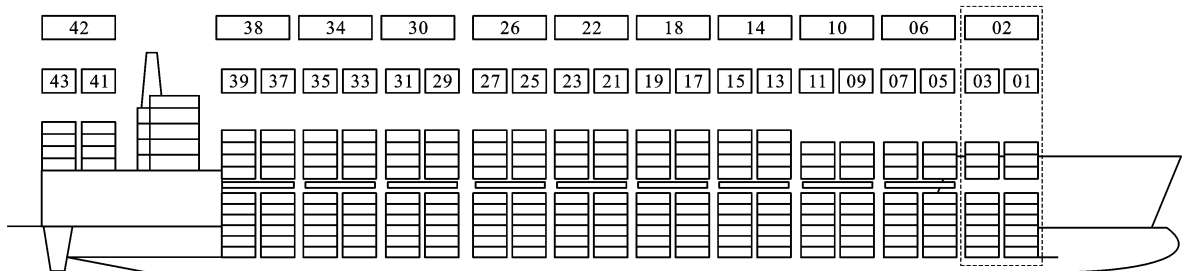


图4 集装箱船贝位布置

Fig.4 Baytal layout of containership

$S$  为船舶稳性;  $S_0$  为船舶稳性下限;  $S_1$  为船舶稳性上限;  $O_{\max}$  为允许的船中最大静水弯矩;  $r$  为船体前半体和后半体质量对船中剖面的力矩和的相关力臂;  $K_n$  为船舶第  $n$  舱的载荷质量, 即货物、油水和船舶常数, 但不包括空船质量;  $\bar{I}_n$  为船舶第  $n$  舱的重心距船中距离的绝对值;  $\Delta_0$  为空船排水量;  $\Delta_1$  为负载船舶排水量;  $L_0$  为船长;  $L_1$  为船宽;  $c$  为船体浮力的相当力臂系数;  $V_n$  为船舶第  $n$  舱浮心至尾柱的距离;  $x_{(g,h)}^{(n,p,q)}$  为位于船舶箱位块  $(n,p,q)$  中从港口  $g$  出发到港口  $h$  的集装箱数量;  $Y_{(g,h)}$  为从港口  $g$  出发到港口  $h$  的集装箱数量;  $u_g^{(n,p,q)}$  为 0-1 决策变量, 当箱位块  $(n,p,q)$  的位置有目的港口为  $g$  的集装箱时为 1, 否则为 0;  $v_g^{(n,p,q)}$  为从港口  $g$  出发时, 箱位块  $(n,p,q)$  中集装箱最远的目的港口编号;  $d_g^{(n,p,0)}$  为 0-1 决策变量, 当舱盖下箱位块内有目的港口为当前港口  $g$  的集装箱, 而甲板上后续目的港口集装箱时为 1, 否则为 0;  $y_{(i,j,k)}^{(n,p,q)}$  为 0-1 决策变量, 当箱位块  $(n,p,q)$  中  $(i,j,k)$  位置有箱时为 1, 否则为 0,  $i,j,k$  分别为贝位编号、栈编号、层编号;  $w_{(i,j,k)}^{(n,p,q)}$  为箱位块  $(n,p,q)$  中  $(i,j,k)$  位置集装箱的质量;  $s_{(i,j,k)}^{(n,p,q)}$  为箱位块  $(n,p,q)$  中  $(i,j,k)$  位置集装箱的目的港口;  $e_{(i,j,k)}^{(n,p,q)}$  为 0-1 决策变量, 当箱位块  $(n,p,q)$  中  $(i,j,k)$  位置的集装箱的目的港口远于其下层  $(i,j,k')$  集装箱的目的港口 ( $k' < k$ ) 时为 1, 否则为 0;  $M_{(i,j,g)}^{(n,p,q)}$  为箱位块  $(n,p,q)$  中目的港口为  $g$  的集装箱位于贝位  $i$  栈  $j$  层数编号的最大值;  $R_i^{(n,p,q)}$  为箱位块  $(n,p,q)$  中贝位  $i$  的总栈数;  $Q_{(i,j)}^{(n,p,q)}$  为箱位块  $(n,p,q)$  中贝位  $i$  栈  $j$  的层数。

## 2.4 数学模型

以  $f_1$  与  $f_2$  为目标函数, 建立以全航线倒箱量最小和吃水差最优为目标的多目标优化模型, 即

$$\min f_1 = \sum_{b=1}^{N_4} f_{11} + f_{12} \quad (1)$$

$$f_{11} = \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{p=1}^{N_2} \sum_{g=1}^{b-1} \sum_{h=b+1}^{v_{b-1}^{(n,p,1)}} x_{(g,h)}^{(n,p,1)} d_b^{(n,p,0)} u_b^{(n,p,0)} \quad (2)$$

$$f_{12} = \sum_{k=M_{(i,j,b)}^{(n,p,1)}+1}^{Q_{(i,j,b)}^{(n,p,1)}} \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{p=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_5} \sum_{j=1}^{R_i^{(n,p,1)}} Z_1 e_{(i,j,k)}^{(n,p,1)} u_b^{(n,p,1)} + \sum_{k=M_{(i,j,b)}^{(n,p,0)}+1}^{Q_{(i,j,b)}^{(n,p,0)}} \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{p=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{R_i^{(n,p,0)}} \sum_{i=1}^{N_5} e_{(i,j,k)}^{(n,p,0)} u_b^{(n,p,0)} \quad (3)$$

$$Z_1 = 1 - d_b^{(n,p,0)}$$

$$\min f_2 = \left| \frac{\sum_{n=1}^{M_1} k_n V_n}{L_1 L_0^2} \right| \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^{N_1} \sum_{p=1}^{N_2} \sum_{q=0}^{N_3} x_{(g,h)}^{(n,p,q)} = Y_{(g,h)} \quad (5)$$

$$\sum_{h=g+1}^{N_4} x_{(g,h)}^{(n,p,q)} + \sum_{b=1}^{g-1} \sum_{h=g+1}^{N_4} x_{(b,h)}^{(n,p,q)} \leq U^{(n,p,q)} \quad (6)$$

$$y_{(i,j,k)}^{(n,p,q)} \geq y_{(i,j,k+1)}^{(n,p,q)} \quad (7)$$

$$y_{(i,j,k)}^{(n,p,q)} w_{(i,j,k)}^{(n,p,q)} \geq y_{(i,j,k+1)}^{(n,p,q)} w_{(i,j,k+1)}^{(n,p,q)} \quad (8)$$

$$K_n \leq W_n \quad (9)$$

$$K_n = \sum_{k=1}^{Q_{(i,j)}^{(n,p,q)}} \sum_{p=1}^{N_2} \sum_{q=0}^{N_3} \sum_{i=1}^{N_5} \sum_{j=1}^{R_i^{(n,p,q)}} w_{(i,j,k)}^{(n,p,q)} \quad (10)$$

$$S_0 \leq S \leq S_1 \quad (11)$$

$$0 \leq \frac{1}{2} (r \Delta_0 + \sum_{n=1}^{N_1} K_n \bar{I}_n - \Delta_1 L_0) \leq O_{\max} \quad (12)$$

式中:  $f_1$  为航线上所有挂靠港口产生的倒箱数量;  $f_{11}$  为压舱盖倒箱数量;  $f_{12}$  为堆栈压箱倒箱数量;  $N_1$  为船舶舱位总数量;  $N_2$  为每个舱位舱盖总数量;  $N_3$  为每个舱位空间分块的总数量, 包括甲板与舱内 2 种情形;  $N_4$  为挂靠港口总数量;  $N_5$  为每个舱位中贝位数量;  $Z_1$  为判定变量, 在当前港口  $b(b > g)$  产生压舱盖倒箱的前提下, 不考虑甲板上的堆栈压箱造成的倒箱, 避免倒箱量的重复计算。

式(1)确保倒箱量最小; 式(2)为压舱盖倒箱约束, 计算原理是找出舱内装有当前港口待卸集装箱的箱位块, 加上甲板上箱位块中目的港口远于当前港口的集装箱数量; 式(3)为堆栈压箱倒箱, 即后到港口集装箱压在先到港口集装箱上面的数量; 式(4)确保吃水差绝对值最小, 为了保证船舶的正常行驶, 吃水差必须是合理的, 其绝对值越小, 越方便使用压载水对其进行调整; 式(5)保证待装集装箱全部装载到集装箱船舶上, 即已装载集装箱数量与港口待装载的数目相等; 式(6)保证船舶箱位块已使用的集装箱箱位数量不能超过该箱位块的总箱位数量; 式(7)保证船舶中的集装箱不存在悬空的情形; 式(8)保证不存在重箱压轻箱的情形; 式(9)、(10)约束每个贝位载荷不能超过其所能承受的限额; 式(11)为稳性约束, 一般集装箱船满载时的稳性  $S$  值在 0.8 ~ 1.2 m,  $S_0$  与  $S_1$  分别为 0.8、1.2 m; 式(12)为强度约束, 在正常装载情况下, 集装箱船舶是处于中拱的状态, 即船中静水弯矩大于 0。

## 3 算法设计

算法的设计思路是先利用启发式算法获得初始可行解, 再利用遗传算法进行优化, 从而得到满意解。为了获得初始可行解, 在普通的启发式算法中加入

优化规则,使得发现较优解的可能性尽可能提高,而且提高了搜寻效率,有效规避了集装箱船舶配载问题的复杂性所带来的搜寻时间过长的问题。具体做法是将集装箱按照目的港口分类,形成集装箱组,采用规则装箱和随机选取结合的方式将集装箱组装载到船舶的各个箱位块中,生成全航线倒箱量为0的初始配载计划。

由于遗传算法能够很好地处理集装箱船舶配载的并行性以及搜索的非线性性质,因而可以将各种约束并入到简化的问题中,使得设计出的算法简洁、有效。当初始可行解生成之后,用遗传算法对其进行优化,实现全航线配载的寻优。

为了满足配载原则,提高算法的收敛能力和结果的合理性,将配载人员的经验融入到算法中,包括:相同特征(同目的港口、同规格、同货物种类)的集装箱的配载集中而又分散,便于倒箱的控制和岸桥的运行;细化配载单元,左右舷对称配载,以降低倒箱量,同时提高安全性能,避免产生横倾。

### 3.1 编码

由于配载问题的复杂性,采用实数编码的方式,构造贝位矩阵表示初始解。解是对整个集装箱船舶的装载状态的具体反映,考虑到集装箱船舶贝位是不规则的,而用于模拟贝位的矩阵是规则的矩形,因此,在矩阵中,把没有与箱位对应的元素赋值为-1,与空箱位对应的元素赋值为0,与非空箱位对应的元素赋值为正整数,表示对应集装箱的目的港口。船舶贝位见图5。

### 3.2 初始解生成与优化

算法一般是随机生成一定数量的个体,并对随机产生过程进行干预,以提高初始种群的质量。初始解的产生采用上述方法,具体步骤如下。

Step 1:将船舶的每2个贝位按照舱盖对应的区域划分为6个独立的装载单元,左舷和右舷合为一组,按照从船首到船尾的方向编号。

Step 2:若船舶上有集装箱,卸载船上目的港口的所有集装箱;然后,将港口一样的所有待装集装箱中同一目的港口的集装箱分组,按照目的港由远到近以及集装箱组中箱量由大到小的顺序排序,分别随机装入不同的箱位块,产生初始可行解。

Step 3:调用箱位块算法和集装箱定位算法,对初始解进行优化。

Step 4:当前港口待装载集装箱均已装载到箱位块中(不存在待装载的同类箱组),则结束;否则,迭代循环,转 Step 3。

1	1							1	1	1
1	1	1	1	3	3	3		1	1	1
1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1
1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	

(a) 贝位 31

1	1	1						1	1	1
1	1	1	1	3	3	3		1	1	1
1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1
1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	
	4	4	4	5	5	5	4	4	4	

(b) 贝位 33

图5 船舶贝位

Fig. 5 Ship bays

### 3.3 遗传杂交与变异

(1)箱位块算法。箱位块算法是为了解决初始解不满足关键性约束的情形,通过遗传算法进行交叉和变异,使稳性、强度等约束得到满足,吃水差寻优的过程。

由于采用的是实数编码方法,也就是矩阵中正数与集装箱是一一对应的关系。由于集装箱规模大,以单个集装箱为单位进行交叉与变异很困难,因此,将集装箱箱位块作为交叉和变异的单位。

交叉为随机产生2个交叉点,当装载的是同类箱组2个箱位块时,将同类箱组重组,重新分配到2个箱位块中。变异为随机产生2个变异点,然后交换2个箱位块中装载的集装箱。交叉和变异的前提是不产生倒箱,否则,重新产生交叉或变异点。

(2)集装箱定位算法。杂交与变异过程中可能产生重箱压轻箱的情况:若为同一起始港口与同一目的港口,则打乱重新排序即可;否则,按照起始港口、目的港口和质量的优先级顺序,确定各个集装箱的位置。

### 3.4 适应度函数

在使用遗传算法寻优的过程中,把目标函数倒箱量最小转化为不产生倒箱,并将其加入到约束中,即在倒箱量为0,满足其他约束条件的情形下,寻找最优吃水差,最优吃水差下的配载计划即为优化后

的最终结果。

通过改进的遗传算法获得良好的配载方案,将吃水差设计为适应度函数,作为检验个体优劣的标准。船舶吃水差一般为负,最优吃水差  $T_0$ 。由船舶本身和实际装载状况决定。为了处理方便,将  $T_0$  设定为 0,适应度函数定义为

$$P_m = |T_m - T_0| = |T_m| \quad (14)$$

式中:  $P_m$  为第  $m$  条染色体的适应度函数;  $T_m$  为第  $m$  条染色体对应的吃水差。

$T_m$  为正是可以接受的,因为它是一个可调值,通过压载水的调整可以将其调为负。

### 3.5 终止规则

每迭代一次,计算每个个体的适应度函数值,并且保留优解。选取迭代步数达到一定数量时终止。若满足约束条件,则输出最优结果;若不满足约束条件,则对群体继续进行遗传操作。改进遗传算法的流程见图 6。

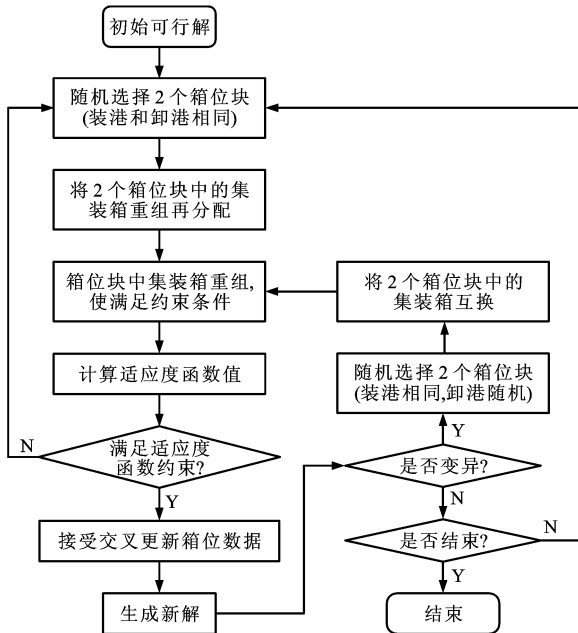


图 6 改进的遗传算法流程

Fig. 6 Improved genetic algorithm flow

## 4 算例求解

### 4.1 案例参数

选取容量为 1 841 TEU、舱盖为 3 开口的集装箱船舶,船舶贝位 13 到贝位 33 能够容纳集装箱的数量均为 98 TEU,其他贝位的容量见表 1。表 2 为船舶参数,表 3 为货物运输量。

表 1 贝位容量

Tab. 1 Bay capacities

贝位编号	01	03	05	07	09	11	35	37	39	41	43
容量/TEU	49	56	75	79	85	85	96	94	90	27	27

表 2 船舶参数

Tab. 2 Containership parameters

船长/ m	船宽/ m	米纵倾力 矩/ (tf · m)	漂心距 尾柱 距离/m	空船平均 吃水/ m	浮心距尾 柱距离/ m	横稳心距 基线 高度/m
189.15	28.40	44 631	95.76	7.52	94.42	12.68

表 3 货运量

Tab. 3 Freight traffic volumes TEU

起始 港口	目的港口				
	B	C	D	E	F
A	214	303	210	98	139
B	—	120	63	85	185
C	—	—	84	126	81
D	—	—	—	194	277
E	—	—	—	—	165

### 4.2 结果分析

将船舶相关参数与运输矩阵代入算法中,可以得到前 5 个港口优化后的配载方案(船舶到达港口 F 后为卸空状态,不需求解),优化前后对比见表 4。

产生的初始解的倒箱量均为 0,但是吃水差的绝对值偏大,通过优化,吃水差的绝对值趋近于 0,并且不大于 0.4 m,在合理的范围 0~0.5 m 内,即获得了满意解。图 7 为前 5 个挂靠港口的优化结果,每个挂靠港口生成的初始配载计划经过 200 次迭代后,均能快速收敛,优化效果符合实际要求。

表 4 初始解与满意解

Tab. 4 Initial and satisfactory solutions

当前港口配载方案	A		B		C		D		E	
	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解
吃水差绝对值/m	4.147 3	0.003 5	1.114 2	0.000 8	2.950 6	0.109 7	0.268 1	0.001 1	2.307 9	0.371 2

图 8 为改进遗传算法与传统遗传算法的优化结果对比,传统遗传算法在 200 次迭代以后,优化效果不明显,而经过 1 000 次迭代,优化结果有所改善,但没有获得最终的满意解。改进遗传算法的优化效

果特别显著,在 200 次迭代之后即可获得满意解,且仅需 1.967 s。

改进的遗传算法的运行时间为 1.967 s,超过同样 200 次迭代的传统遗传算法的时间 0.773 s。但

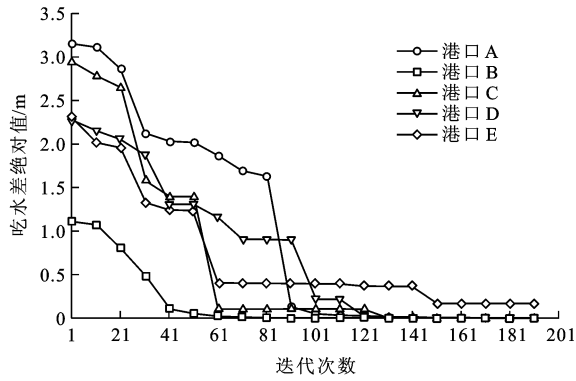


图7 配载优化结果

Fig. 7 Stowage optimal results

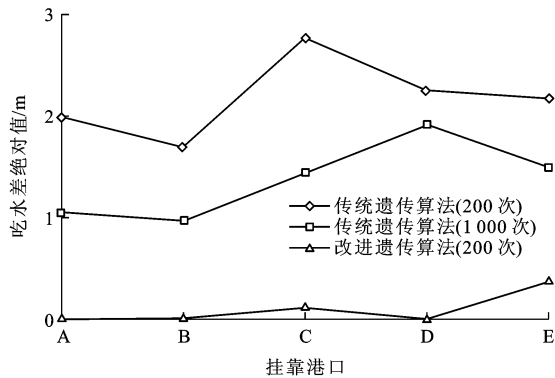


图8 传统遗传算法与改进遗传算法优化结果比较

Fig. 8 Comparison of optimal results for general

GA and improved GA

是若使用传统遗传算法,为了获得较优解,则需要增加迭代次数,1 000次迭代需要3.251 s,运行时间远大于改进的遗传算法,改进的遗传算法用更短时间获得了更优的可行解。

#### 4.3 挂靠港口数量对配载效率的影响分析

挂靠港口数量的增加会影响算法的运行效率,为了进一步验证模型的合理性和算法的有效性,本文计算了挂靠港口数量分别为4、5、6、7、8的算例工况,并进行分析比较。

工况1:港口A到港口B、C、D的运输量分别为394、247、346 TEU,港口B到港口C、D的运输量分别为225、169 TEU,港口C到港口D的运输量为763 TEU。

工况2:港口A到港口B、C、D的运输量分别为205、362、421 TEU,港口B到港口C、D的运输量分别为293、310 TEU,港口C到港口D的运输量为492 TEU。

工况3:港口A到港口B、C、D、E的运输量分别为214、303、210、98 TEU,港口B到港口C、D、E的运输量分别为120、63、85 TEU,港口C到港口D、E

的运输量分别为84、126 TEU,港口D到港口E的运输量为194 TEU。

工况4:港口A到港口B、C、D、E的运输量分别为195、329、102、138 TEU,港口B到港口C、D、E的运输量分别为191、212、57 TEU,港口C到港口D、E的运输量分别为188、141 TEU,港口D到港口E的运输量为287 TEU。

工况5:港口A到港口B、C、D、E、F的运输量分别为214、303、210、98、139 TEU,港口B到港口C、D、E、F的运输量分别为120、63、85、185 TEU,港口C到港口D、E、F的运输量分别为84、126、81 TEU,港口D到港口E、F的运输量分别为194、227 TEU,港口E到港口F的运输量为165 TEU。

工况6:港口A到港口B、C、D、E、F的运输量分别为195、329、102、138、207 TEU,港口B到港口C、D、E、F的运输量分别为191、32、57、173 TEU,港口C到港口D、E、F的运输量分别为88、141、102 TEU,港口D到港口E、F的运输量分别为187、296 TEU,港口E到港口F的运输量为520 TEU。

工况7:港口A到港口B、C、D、E、F、G的运输量分别为214、202、110、108、69、128 TEU,港口B到港口C、D、E、F、G的运输量分别为120、78、169、75、160 TEU,港口C到港口D、E、F、G的运输量分别为74、126、62、156 TEU,港口D到港口E、F、G的运输量分别为154、65、67 TEU,港口E到港口F、G的运输量分别为157、118 TEU,港口F到港口G的运输量为422 TEU。

工况8:港口A到港口B、C、D、E、F、G的运输量分别为176、306、173、56、287、263 TEU,港口B到港口C、D、E、F、G的运输量分别为62、107、93、128、59 TEU,港口C到港口D、E、F、G的运输量分别为192、107、65、139 TEU,港口D到港口E、F、G的运输量分别为172、103、186 TEU,港口E到港口F、G的运输量分别为239、221 TEU,港口F到港口G的运输量为429 TEU。

工况9:港口A到港口B、C、D、E、F、G、H的运输量分别为176、306、173、56、167、63、303 TEU,港口B到港口C、D、E、F、G、H的运输量分别为62、107、93、128、39、126 TEU,港口C到港口D、E、F、G、H的运输量分别为52、107、65、85、93 TEU,港口D到港口E、F、G、H的运输量分别为92、83、106、69 TEU,港口E到港口F、G、H的运输量分别为89、121、194 TEU,港口F到港口G、H的运输量分别为329、224 TEU,港口G到港口H的运输量为319 TEU。

工况 10:港口 A 到港口 B、C、D、E、F、G、H 的运输量分别为 74、143、164、256、55、122、25 TEU,港口 B 到港口 C、D、E、F、G、H 的运输量分别为 62、107、163、34、136、58 TEU,港口 C 到港口 D、E、F、G、H 的运输量分别为 149、107、65、185、93 TEU,港口 D 到港口 E、F、G、H 的运输量分别为 28、41、28、

253 TEU,港口 E 到港口 F、G、H 的运输量分别为 89、121、194 TEU,港口 F 到港口 G、H 的运输量分别为 45、367 TEU,港口 G 到港口 H 的运输量为 156 TEU。

以上 10 个算例工况的求解结果倒箱量均为 0,表 5 为优化前后吃水差对比。

表 5 不同工况下吃水差计算结果

Tab. 5 Calculation results of trim under different conditions

工况	A		B		C		D		E		F		G		运行 时间/s
	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	初始解	满意解	
1	3.7	<0.1	2.8	0.3	3.2	<0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0
2	3.0	0.1	2.0	<0.1	2.5	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0
3	4.0	<0.1	2.8	0.1	0.7	0.3	2.8	0.1	—	—	—	—	—	—	1.3
4	3.4	<0.1	1.5	0.1	1.0	<0.1	1.7	0.4	—	—	—	—	—	—	1.4
5	4.2	<0.1	1.1	<0.1	3.0	0.1	0.3	<0.1	2.3	0.4	—	—	—	—	2.0
6	1.8	<0.1	0.7	<0.1	1.1	<0.1	0.7	<0.1	2.1	0.3	—	—	—	—	1.9
7	2.5	<0.1	4.0	0.2	2.1	0.4	1.3	0.1	3.2	0.2	1.3	0.3	—	—	2.3
8	2.0	<0.1	1.3	<0.1	1.8	0.1	0.7	0.3	0.4	<0.1	1.1	0.1	—	—	2.2
9	3.8	<0.1	2.8	0.1	2.1	<0.1	1.2	<0.1	2.6	<0.1	1.5	0.2	0.9	<0.1	4.2
10	2.9	<0.1	3.6	<0.1	2.8	<0.1	2.3	<0.1	1.5	0.2	2.3	<0.1	1.6	<0.1	4.6

表 5 表明改进的算法均可快速获得满意的全航线配载结果。随着航线挂靠港口数量的增多,算法的运行时间相应增大,但在 5 s 内均能获得满意解,因此,该算法有效,可实现集装箱船舶全航线配载优化问题的求解。

5 结 语

在满足船舶稳性、强度等物理约束下,本文建立以全航线倒箱量最小和吃水差最优为目标的多目标优化模型,解决集装箱船舶全航线配载问题。为了获取全航线各个挂靠港口合理的配载计划,提出了集装箱船舶贝位分块方法,通过细化配载单元,降低配载难度,形成了一种新的配载问题的解决方法;同时考虑全航线的运营特点,结合现有的人工经验配载规则,通过遗传算法实现配载的优化,自动生成挂靠港的配载图,最终所得结果满足集装箱船舶在全航线中的适航要求。通过不同规模的算例的验证,改进的遗传算法求得的配载方案均符合配载规则。该方法为集装箱船舶全航线配载提供了决策依据,提高了配载效率。

参 考 文 献 :

References :

[ 1 ] 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(1): 55-71.  
[ 2 ] 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): 271-279.  
[ 3 ] WILSON I D, ROACH P A. Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning[J]. Journal of Heuristics, 1999, 5(4): 403-418.  
[ 4 ] WILSON I D, ROACH P A. Container stowage planning: a methodology for generating computerized solutions[J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(11): 1248-1255.  
[ 5 ] WILSON I D, ROACH P A, WARE J A. Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study[J]. Knowledge-Based System, 2001, 14(3): 137-145.  
[ 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 ] TIERNEY K, PACINO D, JENSEN R M. On the complexity of container stowage planning problems[J]. Discrete Applied Mathematics, 2014, 169(2): 225-230.  
[ 8 ] DELGADO A, JENSEN R M, JANSREUP 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.  
[ 9 ] AMBROSINO D, SCIOMACHEN A, TANFANI E. Stowing a containership: the master bay plan problem[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, 38(2): 81-99.  
[10] AMBROSINO D, SCIOMACHEN A, TANFANI E. A



- decomposition heuristics for the container ship stowage problem[J]. *Journal of Heuristics*, 2006, 12(3): 211-233.
- [11] PACINO D, DELGADO A, JENSEN R M. Fast generation of near-optimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels[C]// Springer. *Proceedings of the Second International Conference on Computational Logistics*. Berlin: Springer, 2011: 286-301.
- [12] JOHN A, YANG Zai-li, RIAHI R, et al. Application of a collaborative modelling and strategic fuzzy decision support system for selecting appropriate resilience strategies for seaport operations[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(3): 159-179.
- [13] SCIOMACHEN A, TANFANI E. A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(3): 1433-1446.
- [14] 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.
- [15] 孙晓雅, 林 焰. 集装箱船多港 Bay 位排箱的优化方法[J]. *大连海事大学学报*, 2011, 37(1): 9-13.
- SUN Xiao-ya, LIN Yan. Multi-port bay layout optimization method for container ships[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2011, 37(1): 9-13. (in Chinese)
- [16] 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.
- ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen, LU Jing. Scheduling model and algorithm of integrating loading and unloading operations in same ship-bay at container terminal[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(1): 88-93. (in Chinese)
- [17] DUBROVSKY O, LEVITIN G, PENN M. A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem[J]. *Journal of Heuristics*, 2002, 8(6): 585-599.
- [18] 靳志宏, 兰 辉, 郭贝贝. 基于现实约束的集装箱配载优化及可视化[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(9): 1722-1728.
- JIN Zhi-hong, LAN Hui, GUO Bei-bei. Optimization and visualization of the container loading problems with realistic constraints[J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2010, 30(9): 1722-1728. (in Chinese)
- [19] 孙俊清, 陈 忱, 刘凤连. 考虑船舶稳定性的多港口集装箱配载问题[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(32): 236-243.
- SUN Jun-qing, CHEN Chen, LIU Feng-lian. On stowage planning for multi-port container transportation based on stability constraint[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(32): 236-243. (in Chinese)

### Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition)

Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) is a new bimonthly English journal, which is organized by Ministry of Education of China and sponsored by Chang'an University, Southeast University, and Southwest Jiaotong University.

#### Aim & scope

As an academic journal, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) provides a platform for exchange and discussion of novel and creative ideas on theoretical and experimental researches of traffic and transportation. It publishes high-quality peer-reviewed papers of traffic and transportation in the context of civil engineering, industry, materials, information, fuel, economy, and society, as well as the interaction of fields related with traffic and transportation.

The scope of this journal includes road and railway engineering; transport vehicle engineering (such as automobile, train, ship, aircraft, and so on), including its component, operation and maintenance; planning and management of traffic and transportation; traffic information engineering and control.

#### Editorial board

In editorial board, there are 11 academicians of Chinese Academy of Engineering, Canadian Academy of Engineering, and American Academy of Engineering, Zhi-yun SHEN, Kong-hui GUO, Wen-hao LIANG, Chang-wen MIAO, Meng-shu WANG, Ying-ren ZHENG, Yan-liang DU, Jian-guo NIE, Xu-hong ZHOU, Said Easa, and Man-Chung TANG; famous foreigner scholars, Steven Chien, James Tsai, David A Noyce, Lee D Han, Cheng-min FENG, Gang-len CHANG, William G Buttlar, Richard Kim, Musharraf Zaman, Zhan-ping YOU, Bruno Briseghella, Wei-hsing HUANG, Hai-bo CHEN, Kevin Cullinane, Honoré Pierre Yin, Hervé Di Benedetto, et al.

#### Inviting editorial board members

To build an international platform for communication of scientists, our journal is longing for great support of experts, scientists, and scholars in the field of traffic and transportation from all over the world to join in our editorial board. If you or someone you know may have interest in our journal, please contact us at JTTE@chd.edu.cn or JTTE2014@126.com without any hesitation.

#### Call for papers

Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) is calling papers! There are four columns in this journal: road and railway engineering, transport vehicle engineering, planning and management of traffic and transportation, and traffic information engineering and control. All the manuscripts related with traffic and transportation are welcome and appreciated. Please send your manuscript to JTTE@chd.edu.cn or JTTE2014@126.com. Submitted papers will go through normal peer review process.

**Contact:** Yue-jie HAN, Editor of Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)

**Tel:** +86-29-82334388; **http:** //jtte.chd.edu.cn

**Address:** Periodical Office, Chang'an University, Southern Middle Section of the Second Circular Road, Xi'an, Shaanxi, P. R. China

**Post Code:** 710064