

# 带二维装箱约束的客货滚装船配载决策

张煜<sup>a</sup>, 马少康<sup>a</sup>, 马杰<sup>\*b</sup>, 李俊<sup>a</sup>

(武汉理工大学 a. 物流工程学院; b. 航运学院, 武汉 430063)

**摘要:** 客货滚装船长期处于人工配载状态,其独特性导致其无法直接采用已有滚装船配载方法.为提高客货滚装港口配载的决策水平,针对配载过程的两阶段和二维装箱特性,以船舱面积利用率最大为目标,构建客货滚装船配载决策模型.为实现大规模求解,设计偏随机密钥混合遗传算法求解,算法由多阶段启发式嵌入偏随机密钥遗传算法构成.多阶段启发式首先通过首层配载、主体配载和补充配载三段启发式完成初始解构造,其次采用横纵倾优化策略调整船舶稳性.算例研究表明,偏随机密钥混合遗传算法表现良好,且在大规模应用实验中鲁棒性较好,可实现客货滚装船的有效配载.

**关键词:** 水路运输;船舶配载;遗传算法;客货滚装;二维装箱;偏随机密钥

## Passenger-cargo RORO Ships Stowage Planning Decision with Two-dimensional Packing Constraints

ZHANG Yu<sup>a</sup>, MA Shao-kang<sup>a</sup>, MA Jie<sup>b</sup>, LI Jun<sup>a</sup>

(a. School of Logistics Engineering; b. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The stowage planning for the passenger-cargo RORO(Roll-on/roll-off) ship still stays in the manual decision stage. Its particularity makes it impossible to adopt existing stowage methods for RORO ships. In order to improve the stowage planning decision of passenger-cargo RORO ports, the stowage planning decision model is constructed with the maximization of ship cabin area utilization considering two-phase and two-dimensional packing characteristics of stowage planning process. The biased random key hybrid genetic algorithm which composed of a multi-phase heuristic and biased random key genetic algorithm is designed to find large-scale solutions. The initial solution is constructed firstly through the multi-phase heuristic including the first layer stowage planning, main stowage planning and supplementary stowage planning. And then the ship's stability is modified through the heeling and trimming moment optimization strategy. Numerical example shows that the algorithm performs well and has a good robustness for large-scale application experiments. It can achieve the effective stowage planning for the passenger-cargo RORO ship.

**Keywords:** waterway transportation; ship stowage planning; genetic algorithm; passenger-cargo RORO; two-dimensional packing; biased random key

## 0 引言

近年,沿海水路干线客货运量的激增对客货滚装(以下简称“客滚”)业务的效率和决策水平提出更高要求.客滚船配载作为客滚业务的核心环节,对港口效益影响显著.目前,国内客滚船配载普遍采用已有滚装船(如商品车滚装船)的一维配载

方法,即将船舱划分为若干车道,以车长为依据指导配载.但客滚船配载具有其独特性,体现在:①配载对象为社会渡海车辆,到港时间有先后,早期到达与后期到达在服务上存在差异,配载过程呈现两阶段特性;②配载车辆为货车、小车和客车,尺寸变化大,配载时需同时考虑车辆长宽,追求更高

收稿日期:2018-12-24

修回日期:2019-03-28

录用日期:2019-04-04

基金项目:国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71874132);武汉理工大学研究生优秀学位论文培育项目/The Excellent Dissertation Cultivation Funds of Wuhan University of Technology(2018-YS-074).

作者简介:张煜(1974-),男,天津人,教授,博士.

\*通信作者:majie@whut.edu.cn

的面积利用率,配载要求上呈现二维装箱特性.以上特征导致已有方法难以适用于客滚船配载决策,现实作业中仍主要依靠人工经验完成配载,受人为因素影响大.

已有滚装船研究集中于配载优化模型<sup>[1]</sup>、多挂靠港配载<sup>[2]</sup>和系统可视化开发<sup>[3]</sup>等方面,配载决策时仍采用面积累加或车长累加等方法,大多未考虑车辆在船舱的具体位置.近年来,客滚船研究较少,且主要侧重船舶设计<sup>[4]</sup>等方面,少有文献专门针对客滚船配载展开研究.同时,鉴于客滚船配载的二维装箱特性,可采用二维装箱相关理论求解.目前,二维装箱理论研究较为成熟,有大量可靠的高效算法<sup>[5]</sup>,并被广泛运用于船闸调度<sup>[6]</sup>、车辆配送<sup>[7]</sup>等工程实际.

为此,本文基于客滚船配载实际,考虑其两阶段和二维装箱特性,构建混合整数线性规划模型,并设计偏随机密钥混合遗传算法.通过多组实验来验证模型和算法的有效性,为客滚港口配载决策提供支持.

1 问题描述

若将车辆看作物品,船舶看作长宽固定的箱

子,则客滚船配载问题具有二维装箱特性,体现在:①实际配载不受车道限制,需考虑车辆长和宽,与二维矩形装箱维度一致;②车辆只从船尾进入船舱,且任一空间不能同时被两辆车占用,与二维矩形装箱规则一致;③船舶长宽固定,且只有一部分车辆可以装入船舱以实现效益最大化,与二维矩形装箱目标一致.

实际中,由于受到大量作业要求限制,客滚船配载又有两阶段特性,如图1所示.首先,配载前中期,由于船舱剩余面积充足,港方须将到达车辆全部装入船舱,记为主体配载(Main Stowage Planning, MSP)阶段;其次,配载后期,由于船舱剩余面积有限,港方须在剩余车辆中挑选部分装入船舱,当配载重量达到船舶额定载荷的90%或船舱已满时,则终止配载,记为补充配载(Supplemental Stowage Planning, SSP)阶段.实际作业中,港方常以额定配载长度的80%作为配载阶段的分界点,基于此本文以已装入车辆总面积占船舱面积的80%划分MSP与SSP阶段.由于船尾区域卸载难度较弱,同时小车具有体积小、转向灵活等特性,为更加高效利用船尾剩余面积,仅在船舱长度的后20%区域内允许小车旋转放置,因此该问题还具有复杂的旋转特性.

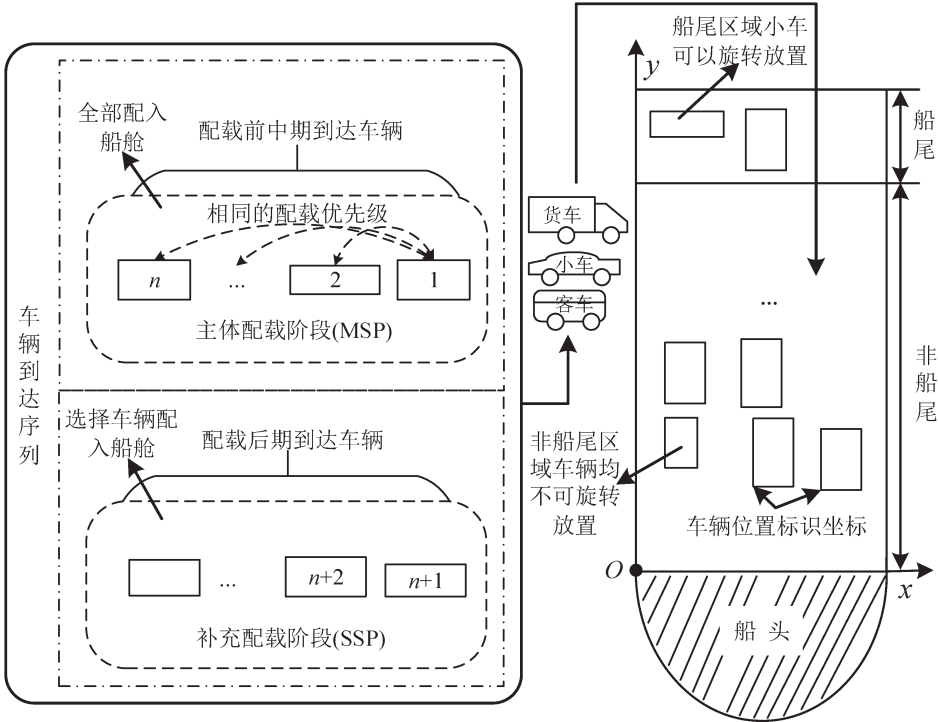


图1 客货滚装船配载决策  
Fig. 1 Passenger-cargo RORO ships stowage planning decision

此外,为保证航行安全,还需考虑船舶稳性和车辆安全距离等现实约束.因此,客滚船配载可视为带两阶段特性的复杂二维矩形装箱问题.考虑到客滚港口存在车辆积压问题,为保证尽快发送车辆和旅客,配载时会最大程度装满船舱.同时,由于货车收费远高于小车和客车,过多考虑航次收益会导致优先选择货车,有悖MSP阶段配载原则及港口服务宗旨.因此,配载决策时考虑船舱面积利用率最大化,既可提高港口运作效率,也可在一定程度上保证航次收益.

## 2 模型构建

### 2.1 前提与假设条件

针对客滚船配载特点,做出如下假设:

(1) 以船舶可配载区域左下角建立 $xoy$ 坐标系,如图1所示.

(2) 假设船舱和车辆为质量均匀的矩形.

(3) 假设待配载车辆数大于船舶最大容量,车辆信息已知.

### 2.2 模型建立

模型的参数定义:

(1) 集合.

$I$ ——待配载车辆序号集合,按到达顺序依次编号, $I=\{i|i=1,2,\dots,|I|\}$ ;

$I_s$ ——待配载小车序号集合;

$I_b$ ——待配载大车序号集合,即客车和货车, $I_b=I-I_s$ ;

$I_1$ ——MSP阶段车辆序号集合, $I_1=\{i|i=1,2,\dots,|I_1|\}$ ;

$I_2$ ——SSP阶段车辆序号集合, $I_2=I-I_1$ .

(2) 参数.

$i$ ——待配载车辆序号, $i \in I$ ;

$W, L$ ——客滚船的宽度和长度(dm);

$d_x, d_y$ ——车辆与车辆之间、车辆与舱壁之间的 $x$ 轴方向和 $y$ 轴方向的安全距离(dm);

$\bar{w}_i, \bar{l}_i$ ——车辆 $i$ 的原始宽度和长度(dm);

$w_i, l_i$ ——车辆 $i$ 加上安全距离 $d_x$ 和 $d_y$ 的宽度和长度, $w_i = \bar{w}_i + d_x, l_i = \bar{l}_i + d_y$ ;

$m_i$ ——车辆 $i$ 的质量(t);

$M$ ——一个大数;

$G$ ——船舶的额定载重量(t);

$T_x$ ——船舱在 $x$ 轴方向的最大横倾力矩(kN·m);

$T_y$ ——船舱在 $y$ 轴方向的最大纵倾力矩(kN·m).

(3) 变量.

$(x_i, y_i)$ ——车辆 $i$ 在船舱内的左下角坐标(dm);

$z_{ij}$ ——0-1变量,若车辆 $i$ 在车辆 $j$ 的左方,则为1,即 $x_i + w_i \leq x_j$ 或 $x_i + l_i \leq x_j$ ,否则为0;

$b_{ij}$ ——0-1变量,若车辆 $i$ 在车辆 $j$ 的下方,则为1,即 $y_i + l_i \leq y_j$ 或 $y_i + w_i \leq y_j$ ,否则为0;

$s_i$ ——0-1变量,若车辆 $i$ 配入船舱,则为1,否则为0;

$\bar{r}_i$ ——0-1变量,若小车 $i$ 允许旋转放置,则为1,否则为0;

$r_i$ ——0-1变量,若小车 $i$ 已旋转放置,则为1,否则为0.

$|I_1|$ 由 $\sum_{i=1}^{|I_1|} l_i w_i \leq 0.8LW < \sum_{i=1}^{|I_1|+1} l_i w_i$ 唯一确定,则问题的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型为

$$\text{obj } f = \max \sum_{i \in I} s_i l_i w_i / LW \quad (1)$$

$$\text{s.t. } z_{ij} + z_{ji} + b_{ij} + b_{ji} + (1 - s_i) + (1 - s_j) \geq 1, \forall i \neq j; i, j \in I \quad (2)$$

$$x_i + r_i l_i + (1 - r_i) w_i \leq x_j + M(1 - z_{ij} + 2 - s_i - s_j), \quad \forall i \neq j; i \in I_s; j \in I \quad (3)$$

$$y_i + r_i w_i + (1 - r_i) l_i \leq y_j + M(1 - b_{ij} + 2 - s_i - s_j), \quad \forall i \neq j; i \in I_s; j \in I \quad (4)$$

$$x_i + w_i \leq x_j + M(1 - z_{ij} + 2 - s_i - s_j), \forall i \neq j; i \in I_b; j \in I \quad (5)$$

$$y_i + l_i \leq y_j + M(1 - b_{ij} + 2 - s_i - s_j), \forall i \neq j; i \in I_b; j \in I \quad (6)$$

$$x_i + r_i l_i + (1 - r_i) w_i \leq W + M(1 - s_i), \quad \forall i \in I_s \quad (7)$$

$$y_i + r_i w_i + (1 - r_i) l_i \leq L + M(1 - s_i), \quad \forall i \in I_s \quad (8)$$

$$x_i + w_i \leq W + M(1 - s_i), \quad \forall i \in I_b \quad (9)$$

$$y_i + l_i \leq L + M(1 - s_i), \quad \forall i \in I_b \quad (10)$$

$$s_i = 1, \forall i \in I_1 \quad (11)$$

$$M\bar{r}_i - (y_i - 0.8L) \geq 0, \forall i \in I_s \quad (12)$$

$$M\bar{r}_i - (y_i - 0.8L) \leq M, \forall i \in I_s \quad (13)$$

$$\bar{r}_i = 0, \quad \forall i \in I_b \quad (14)$$

$$r_i \leq \bar{r}_i, \forall i \in I_s \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} m_i s_i \leq 0.9G, \forall i \in I \tag{16}$$
$$-T_x \leq \sum_{i \in I} m_i s_i \{x_i + [r_i l_i + (1 - r_i)w_i - W]/2\} \leq T_x, \forall i \in I \tag{17}$$
$$-T_y \leq \sum_{i \in I} m_i s_i \{y_i + [r_i w_i + (1 - r_i)l_i - L]/2\} \leq T_y, \forall i \in I \tag{18}$$
$$x_i, y_i \in N_+, \forall i \in I \tag{19}$$
$$z_{ij}, b_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \neq j; i, j \in I \tag{20}$$
$$s_i \in \{0, 1\}, \forall i \in I \tag{21}$$
$$r_i, \bar{r}_i \in \{0, 1\}, \forall i \in I \tag{22}$$

式(1)为目标函数,表示最大化船舱面积利用率;式(2)~式(6)保证装入的每辆车都垂直放置在船舱中,车辆间无干涉,大车不可旋转放置,小车允许旋转放置;式(7)~式(10)保证车辆完全放入船舱中,无溢出;式(11)保证MSP阶段车辆全部装入船舱;式(12)~式(14)表示 $\bar{r}_i$ 与 $y_i$ 之间的关系,若 $y_i \geq 0.8L$ ,则 $\bar{r}_i = 1$ ,否则 $\bar{r}_i = 0$ ;式(15)表示 $r_i$ 与 $\bar{r}_i$ 之间的关系,若 $\bar{r}_i = 1$ ,则 $r_i \in \{0, 1\}$ ,若 $\bar{r}_i = 0$ ,则 $r_i = 0$ ;式(16)为额定载重量约束;式(17)和式(18)为船舶稳性约束;式(19)~式(22)定义变量范围。

将上述 MILP 模型中车辆干涉约束式(2)~式(10)、旋转特性约束式(12)~式(15)和稳性约束式(17)~式(18)松弛,仅以车辆面积累加不超过船舱面积作为本问题的上界模型(Upper Bound Model, UBM),其中式(23)表示车辆总面积不超过船舱面积。

$$\sum_{i \in I} l_i w_i \leq LW, \forall i \in I \tag{23}$$
$$(UBM) \left\{ f = \max \sum_{i \in I} s_i l_i w_i / LW: \text{式(11), 式(16), 式(21), 式(23)} \right\}$$

3 算法设计

3.1 算法架构

鉴于问题的复杂特性,设计偏随机密钥混合遗传算法(Biased Random Key Hybrid Genetic Algorithm, BRKHGA),将多阶段启发式嵌入偏随机密钥遗传算法中,实现装船序列与配载方案的有效映射,架构如图2所示。

3.2 偏随机密钥遗传算法

3.2.1 染色体及适应值

染色体编码如图3所示。图例中,染色体两段

分别对应MSP和SSP阶段车辆到达序号,均采用随机数编码并分别排序。适应值由目标函数获取。

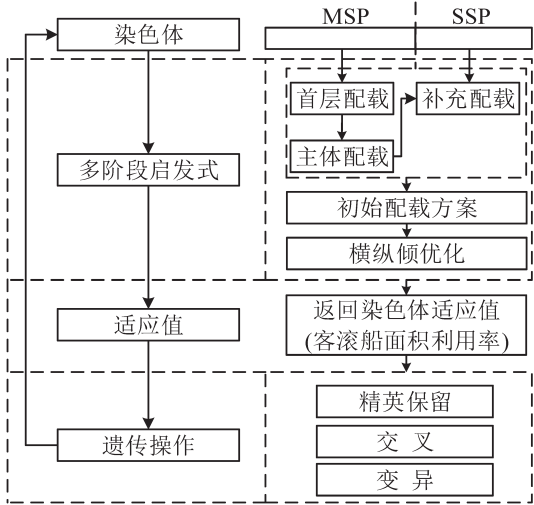


图2 算法框架  
Fig. 2 Algorithm framework

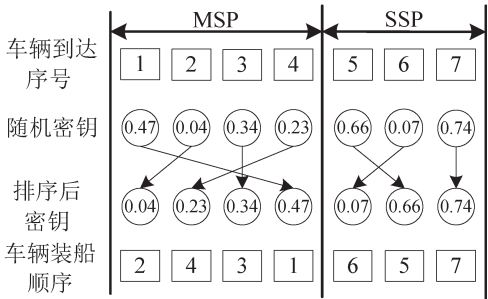


图3 装船序列染色体编码

Fig. 3 Chromosome coding of vehicles packing sequence

3.2.2 遗传操作

借鉴文献[8]的偏随机密钥遗传算法,由复制、变异和交叉3种操作各产生相应比例群体构成新一代种群,如图4所示。

3.3 多阶段启发式

3.3.1 初始解构造

船舱首层的车辆布局对船舶稳性影响较大,针对MSP阶段设计首层配载和主体配载2个启发式,再结合SSP阶段的补充配载启发式,构造初始配载方案。

(1) 首层配载。

客滚船配载中,首层配载的关键在于将尺寸相同或相似车辆放置在船舶首层的左右两侧,并当首层空隙无法放入两长宽相同或相似车辆时,选择可放入空隙的2辆车或宽度最大的1辆车进行插空,如图5所示。



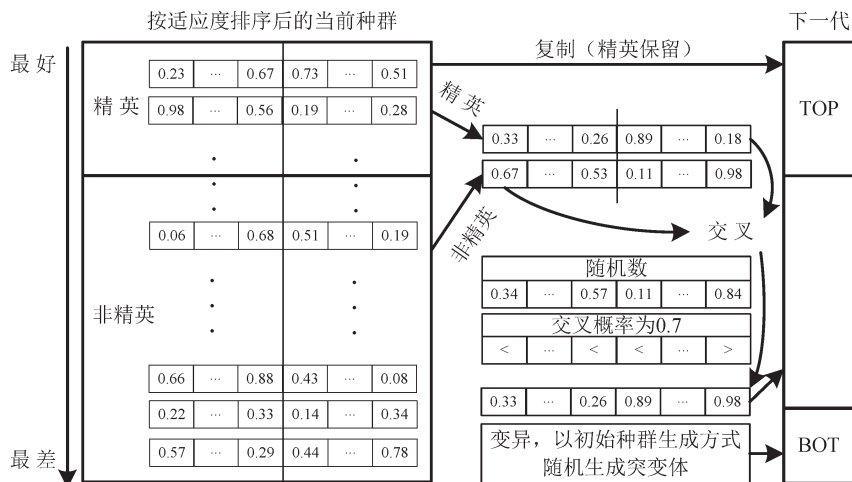


图4 算法的遗传操作

Fig. 4 Genetic operation of algorithm

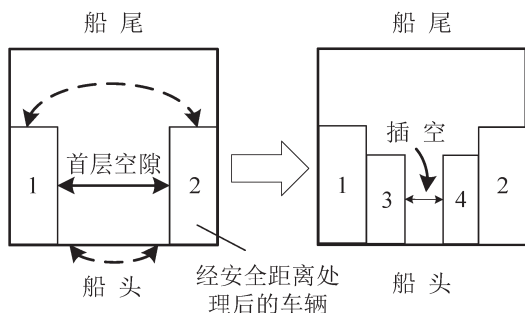


图5 首层配载

Fig. 5 First layer stowage planning

## (2) 主体配载.

主体配载主要用于MSP阶段剩余车辆在船舱中的位置确定,提出评分策略评判配载的优劣.参考轮廓线<sup>[5]</sup>定义船舶配载面,如图6(a)所示,车辆形成的配载面可由 $k$ 个水平线段从左至右组成序列 $E=\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_k\}$ 表示,元素 $e_j=\{x, y, w\}$ . $x$ 和 $y$ 表示 $e_j$ 的左端点坐标; $w$ 表示 $e_j$ 的宽度. $y$ 值最小的配载面成为最低配载面,记为 $e_{\min}$ .评分策略如图6(c)所示,以放置后匹配程度作为评判依据.当待装入车辆宽度与 $w$ 相同且放入后配载面数量减少,平整度变高,记为3分,以此为基准,宽度小于 $w$ 减1分,配载面增加1个减1分.

如图6(b)所示,沿 $y$ 轴方向将船舶等分为左侧和右侧空间.配载过程如下:首先,找出当前状态下的 $e_{\min}$ ,并确定其所处空间(以 $e_{\min}$ 的中心横坐标 $(x+w)/2$ 记);其次,查找MSP阶段序列中首个能装船且分值最高的车辆,若存在则放入 $e_{\min}$ ,若不存在则升高 $e_{\min}$ 至相邻配载面最低处;最后,更新 $E$ ,重复

上述操作至MSP阶段配载完成.特别地,对于评分为0的车辆,当 $e_{\min}$ 处于左侧空间则放于左侧,反之放于右侧,使船舶获得更好横倾.

## (3) 补充配载.

如图7所示,为避免MSP阶段尾声升高的配载面下方空间被浪费,将升高但无车辆放置的配载面回退至原配载面,以此作为SSP阶段配载的基础.补充配载继续沿用主体配载的方法,但当 $e_{\min}$ 的纵坐标 $y$ 处于船尾时,需考虑小车的旋转特性.

## 3.3.2 横纵倾优化

上述初始解构造时主要考虑船舶横倾,难以保证满足其稳性要求.由于船舶稳性主要由质量很大的货车决定,且存在尺寸相同、质量不同的货车,考虑互换已装船的同尺寸货车来进行调整.互换操作时,若存在多组可互换货车,则选取互换后船舶稳性更优的方案.重复上述操作至满足下列条件之一时终止:①配载方案已满足船舶稳性要求;②已无可互换货车.若调整后的配载方案仍不满足船舶稳性要求,则置其适应值为0.

# 4 实验设计与分析

## 4.1 算例设计

基于琼州海峡某港口实际作业,设置晚间和日间2个实验场景:其中,晚间场景(W)货车较多,小车较少,无客车;日间场景(R)小车较多,两种场景下的车辆比例如表1所示.为验证模型和算法的有效性,模拟2艘长宽较小的客滚船为小规模实验

对象,并选取3种实际客滚船为应用实验对象,如表2所示.货车、小车和客车均考虑多种车型,车辆的具体信息如表3所示.基于假设条件(3),定义参数 $p$ 来确定待配载车辆数 $|I|$ 的值.在式(24)和式(25)中,给定参数 $p$ 的值时,存在唯一的待配载车辆数 $|I|$ 使不等式同时成立.

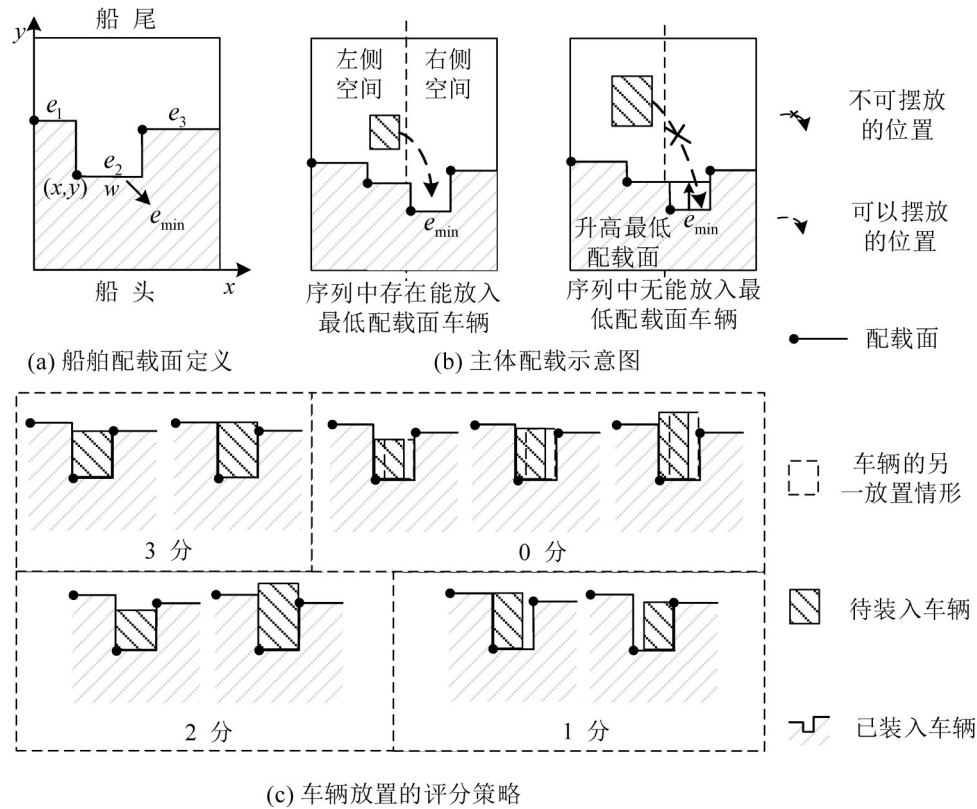


图6 主体配载及其评分策略

Fig. 6 Main stowage and its scoring strategy

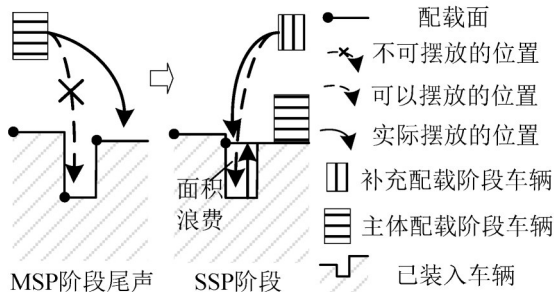


图7 阶段过渡产生的面积浪费

Fig. 7 Area waste due to phase transition

$$p \sum_{i=1}^{|I|} l_i w_i \leq LW \quad (24)$$

$$p \sum_{i=1}^{|I|+1} l_i w_i > LW \quad (25)$$

同时,不同车辆的重量按实际随机生成,车辆间安全距离设为0.2 m,参数 $p$ 设为0.5或0.9.采用诸如S1-W-B1-P1的方式来表示不同算例,其中,第1部分S1表示船型,第2部分W表示场景,第3

部分B1表示车辆比例,第4部分P1表示待配载车辆数量按 $p=0.5$ 生成,若为P2则按 $p=0.9$ 生成.

表1 实验场景及其车辆比例  
Table 1 Experimental vehicle rates

场 景	晚间(W)			日间(R)		
	货 车	小 车	客 车	货 车	小 车	客 车
比例1(B1)	0.7	0.3	0	0.4	0.5	0.1
比例2(B2)	0.6	0.4	0	0.3	0.6	0.1

表2 实验客滚船信息  
Table 2 Passenger-cargo RORO ships

客滚船	船长/m	舱宽/m	载重量/t	最大横倾力矩/(kN·m)	最大纵倾力矩/(kN·m)
M1	22	4	55	600	330 0
M2	62	9	650	135 0	930 0
S1	88	16	980	240 0	132 00
S2	116	18	190 0	270 0	174 00
S3	124	18	270 4	270 0	186 00

表3 车辆类型及数据  
Table 3 Types and data of vehicles

类别	类型	长/m	宽/m	实际重量/t
货车	厢式	8.0		4.9~8.5
	冷藏车	8.6		7.8~15.8
	仓栅式	9.0	2.5	5.8~16.0
	自卸车	9.1		8.0~16.0
	栏板式	12.0		10.0~31.0
	平板车	11.9	2.5	11.4~28.0
	半挂车	12.5		4.5~38.0
集装箱车	20英尺	9.5		20.0~28.0
	40英尺	13.0	2.6	25.0~40.0
小车	面包车	4.5	1.7	1.3
	小轿车	4.6	1.8	1.2
	MPV	4.7	1.8	1.5
	SUV	5.1	2.0	2.2
客车	小型	7.2	2.2	5.7
	大型	8.7	2.5	9.0

#### 4.2 小规模实验

MILP模型采用Gurobi 7.5求解,设置模型求解时间为500 s;BRKHGA采用python3.6编程,设置种群规模为50,迭代次数为100代,交叉概率为0.7,复制比例为0.1,变异比例为0.2,所有算例均在intel i5 2.3 GHz的8 GB内存的平台上求解.每个算例运行10次取平均值,结果如表4所示, $f$ 表示船舱面积利用率, $T$ 表示算例求解时间,\*表示达到500 s输出的解.

由表4可知,对于船舶M1,MILP模型和BRKHGA均在短时间内找到最优解,但前者求解时间更优;对于船舶M2,由于算例规模增大,MILP模型在有限时间内无法找到最优解,且在500 s输出的可行解均劣于BRKHGA.总体来看,BRKHGA求解性能优于MILP模型,且在M1中均寻得最优解.

#### 4.3 应用实验

应用实验中,由于船舶体型远大于4.2节中M1与M2,MILP模型大多在有限时间内无法求得可行解,因此应用实验中不再列出.BRKHGA参数设置同4.2节,迭代次数增至200代,结果如表5所示, $f(\text{avg})$ 、 $f(\text{min})$ 、 $f(\text{max})$ 和 $f(\text{std})$ 分别对应算例

运行10次后的船舱面积利用率的平均值、最小值、最大值和标准差,gap表示 $f(\text{avg})$ 与上界模型(UBM)求解结果的偏差.

表4 小规模实验结果  
Table 4 Results of small scale experiments

算例	待配载车辆数	MILP		BRKHGA	
		$f/\%$	$T/\text{s}$	$f/\%$	$T/\text{s}$
M1-W-B1-P1	9	64.13	<0.10	64.13	3.40
M1-W-B1-P2	5	64.05	<0.10	64.05	2.59
M1-W-B2-P1	11	72.32	0.81	72.32	4.14
M1-W-B2-P2	6	63.06	0.11	63.06	3.20
M1-R-B1-P1	12	81.75	0.50	81.75	4.09
M1-R-B1-P2	7	70.23	<0.10	70.23	3.50
M1-R-B2-P1	12	71.09	1.49	71.09	4.46
M1-R-B2-P2	8	70.00	0.12	70.00	3.87
M2-W-B1-P1	57	85.15*	500.00	88.33	45.92
M2-W-B1-P2	32	87.71*	500.00	89.44	24.68
M2-W-B2-P1	59	86.60*	500.00	89.02	47.99
M2-W-B2-P2	34	87.22*	500.00	88.49	27.90
M2-R-B1-P1	65	82.86*	500.00	89.35	49.05
M2-R-B1-P2	40	85.05*	500.00	88.00	34.74
M2-R-B2-P1	79	84.59*	500.00	90.00	70.05
M2-R-B2-P2	44	85.06*	500.00	90.25	38.60
平均		77.55	250.19	79.34	23.01

由表5可知,对于船舶S1,算法求解结果与UBM的gap值均低于4.0%且相对稳定;而对于船舶S2和S3,当小车比例较低时,算法求解结果gap值较大,但随着小车比例增大,呈波动下降趋势,这说明船舶宽度不同造成的空隙差异会影响配载结果.具体来说:船舶S2和S3宽度为18 m,大车在底层产生空隙可被小车填充,若小车比例较低,无法完全填充空隙,极易造成面积浪费;而船舶S1宽度为16 m,大车在底层产生的空隙很小,无法被小车填充,因此小车比例对配载结果影响不大,船舱面积利用率保持相对稳定.

总体来看,对于3类典型客滚船,算法求解结果普遍高于0.95,平均gap值低于3.5%,平均标准差在0.0020左右,展现出较好的求解性能.此外,采用python语言实现配载可视化,图8为算例S2-R-B1-P2的单车求解结果,车上所标数字为车辆到达序号.

表5 应用实验结果  
Table 5 Results of application experiments

算 例	待配载 车辆数	UBM	BRKHGA				
		$f/\%$	$f(\text{avg})/\%$	$f(\text{min})/\%$	$f(\text{max})/\%$	$f(\text{std})$	gap/%
S1-W-B1-P1	136	100.00	96.92	96.69	97.21	1.68E-03	3.08
S1-W-B1-P2	77	100.00	96.56	95.97	96.95	3.00E-03	3.44
S1-W-B2-P1	154	100.00	97.04	96.86	97.33	1.53E-03	2.96
S1-W-B2-P2	86	100.00	96.27	96.11	96.42	1.57E-03	3.77
S1-R-B1-P1	177	99.99	97.47	96.81	98.48	5.04E-03	2.52
S1-R-B1-P2	97	99.99	96.92	96.75	97.25	1.45E-03	3.07
S1-R-B2-P1	189	100.00	96.90	96.04	97.38	4.51E-03	3.10
S1-R-B2-P2	104	99.99	96.93	96.61	97.77	3.08E-03	3.06
S2-W-B1-P1	200	99.99	93.90	93.59	94.18	4.16E-03	6.09
S2-W-B1-P2	115	100.00	94.46	94.30	94.78	1.68E-03	5.54
S2-W-B2-P1	221	99.99	96.41	96.28	96.58	1.45E-03	3.58
S2-W-B2-P2	121	99.91	95.55	95.36	95.77	2.35E-03	4.36
S2-R-B1-P1	255	99.99	97.64	97.44	97.81	2.07E-03	2.35
S2-R-B1-P2	137	99.99	97.91	97.61	98.45	1.17E-03	2.08
S2-R-B2-P1	279	100.00	98.14	97.56	99.02	1.28E-03	1.86
S2-R-B2-P2	165	100.00	97.92	97.38	98.27	2.65E-03	2.08
S3-W-B1-P1	216	99.99	94.60	94.48	94.81	2.23E-03	5.39
S3-W-B1-P2	118	99.99	94.27	94.15	94.32	6.27E-04	5.72
S3-W-B2-P1	239	100.00	95.86	95.60	95.99	1.47E-03	4.14
S3-W-B2-P2	134	99.99	95.86	95.62	95.96	1.24E-03	4.14
S3-R-B1-P1	263	99.99	97.45	97.08	97.95	3.12E-03	2.54
S3-R-B1-P2	152	99.99	98.35	97.97	98.92	3.58E-03	1.65
S3-R-B2-P1	309	100.00	98.22	98.07	98.30	9.08E-04	1.78
S3-R-B2-P2	167	100.00	97.78	97.14	98.37	4.01E-03	2.22
平 均		99.99	96.64	96.31	97.01	2.33E-03	3.36

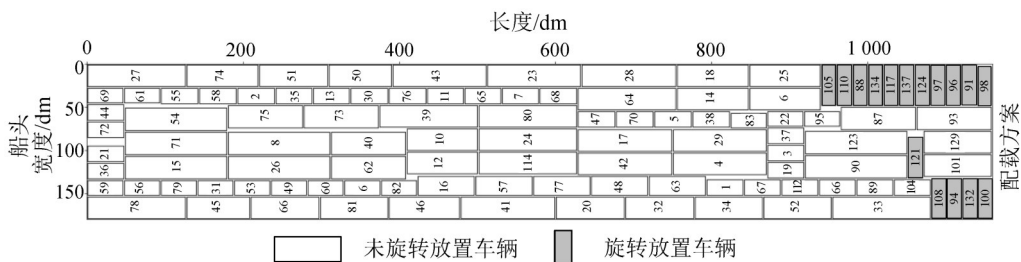


图8 配载可视化展示

Fig. 8 Visual display of stowage

5 结 论

本文针对客滚船配载决策问题,考虑其二维装箱和两阶段特性,为保障港口运作效益,以最大化船舱面积利用率为目标,构建问题的混合整数线性规划模型.同时,鉴于其复杂特性,设计随机密钥混合遗传算法求解.算例研究验证了模型与算法的有效性,且算法求解性能远优于模型,可辅助实现客滚船实际配载决策.后续,将针对客滚船配载时,车辆信息无法完全已知的动态

特性展开研究.

参考文献:

[1] 靳志宏,金燕燕. 滚装船配载优化算法及其软件化实现[J]. 中国航海, 2010, 33(2): 84-88. [JIN Z H, JIN Y Y. A two-phase heuristic algorithm for ro-ro ship stowage planning[J]. Navigation of China, 2010, 33(2): 84-88.]

[2] 姜彦宁,徐奇,金燕燕,等. 现实约束下的多挂靠港滚



- 装船舶配载优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(1): 117-123. [JIANG Y N, XU Q, JIN Y Y, et al. Optimization of ro-ro ship loading for multiple ports based on realistic constraints[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(1): 117-123.]
- [3] MURGOITIO J, VÁZQUEZ F, SAMANIEGO R, et al. Spanish initiative for fully automated stowage on roll-on/roll-off operations ☆ [J]. Transportation Research Procedia, 2016(14): 173-182.
- [4] PINKSTER J, JOURNEE J, TAN S G. Further optimisation of the enlarged ship concept applied to RORO cargo/passenger vessel[C]// Proceedings of the 2nd International Shipbuilding Conference, 1999.
- [5] WEI L, HU Q, LEUNG S C H, et al. An improved skyline based heuristic for the 2D strip packing problem and its efficient implementation[J]. Computers & Operations Research, 2016(80): 113-127.
- [6] VERSTICHEL J, CAUSMAECKER P D, SPIEKSMAN F C R, et al. Exact and heuristic methods for placing ships in locks[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2): 387-398.
- [7] ZACHARIADIS E E, TARANTILIS B C D. A guided tabu search for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 195(3): 729-743.
- [8] GONÇALVES J F. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization[J]. Journal of Heuristics, 2011, 17(5): 487-525.

---

#### 上接第 192 页

- [6] 禹丹丹, 韩宝明, 张琦, 等. 基于灵活编组的轨道交通列车开行方案优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(6): 21-31. [YU D D, HAN B M, ZHANG Q, et al. Optimization method for train plan of urban rail transit based on the flexible length of train formation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(6): 21-31.]
- [7] 戎亚萍, 张星臣, 柏赞, 等. 城市轨道交通多编组列车开行方案优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 117-122. [RONG Y P, ZHANG X C, BAI Y, et al. Optimization method for train plan of urban rail transit based on hybrid train formation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 117-122.]
- [8] 许得杰, 毛保华, 雷莲桂. 城市轨道交通大小交路列车开行方案优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 120-126. [XU D J, MAO B H, LEI L G. Optimization for train plan of full-length and short-turn routing in urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 120-126.]
- [9] 牛惠民, 陈明明, 张明辉. 城市轨道交通列车开行方案的优化理论及方法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 128-133. [NIU H M, CHEN M M, ZHANG M H. Optimization theory and method of train operation scheme for urban rail transit[J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 128-133.]
- [10] OLDFIELD R, BLY P. An analytic investigation of optimal bus size[J]. Transportation Research Part B, 1988, 22(5): 319-337.