

汽车专运船单层甲板装载配载优化

孙霄峰^{*1}, 沈 晔², 许昕鹜¹, 尹 勇¹

(1. 大连海事大学 航海动态仿真和控制交通运输行业重点实验室, 辽宁 大连 116026;

2. 武汉数字工程研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要:为减少多港装卸汽车专运船单层甲板内部由于不合理的车辆摆放顺序而造成的移货代价,利用启发式算法以先制订再优化的思路生成单层甲板的配载方案.首先建立甲板和装载车辆坐标网格模型;然后利用 GRASP 算法将车辆插入甲板空位中,得到初始配载方案;最后利用 Dijkstra 算法和 ALNS 算法对配载方案进行优化.以上海船舶研究设计院研发的汽车专运船 VIKING CONQUEST 为例,选取主装货甲板进行配载,并将算法配载结果和 7 个人工配载方案进行对比.结果表明:所提算法可以生成移货代价较小的配载方案,有利于提高汽车专运船运输的效率.

关键词:水路运输;汽车专运船;多挂靠港;配载优化;GRASP 算法;ALNS 算法

中图分类号:U695.293 **文献标识码:**A **doi:**10.7511/dllgxb201906013

0 引言

汽车专运船以车辆为运输单元进行运输.在多港装卸的情况下,有时需要将不同装卸港的车辆装载到同一层甲板上,如果车辆在甲板上的摆放位置设计得不合理,在装卸时就需要耗费额外成本对阻碍装卸的车辆进行移除.因此,采取产生移货现象较少的配载方案可以提高运输效率,以节约运输成本.为制订高效的配载方案,减轻人工设计配载方案的工作量,国内外学者设计了一些用于解决汽车专运船配载问题的算法:金燕燕^[1]以最大运费为优化目标,利用车道划分装货甲板的方式设计了单层甲板单一装卸港的滚装船配载算法;靳志宏等^[2]和权义柯^[3]以同样的方法分别设计了多层装载滚装船在单一装卸港及多港装卸情况下的配载算法;Øvstebø 等^[4]以最大化运输可选货物产生的运费和车道内车辆的排列位置作为优化目标,设计了滚装船单层甲板多港装卸的配载系统;Hansen 等^[5]使用与 Øvstebø 相同的方法,利用网格划分甲板的方式设计了滚装船单层甲板多港装卸的配载系统,并以设置的最大运行

时间作为迭代终止的条件.但由于算法的收敛时间比较难以把握,当最大运行时间设置得过长时,如果算法很快收敛,则后续的无用迭代导致算法的效率过低;而当最大运行时间设置得过短时,计算很可能还未收敛就被迫结束.

国内学者大多将滚装船的装货区域划分为车道,以车道为装货单元进行配载,且不区分车辆在车道内的具体摆放位置.然而这种方法有明显的局限性:当在同一层甲板上装载占地形状不同的车辆时,该方式将导致很多空间无法利用,并且在制订配载方案时灵活性不好.此外,国内的研究忽略了当装卸港不同的车辆在同一层甲板上装载时可能产生的移货代价.

针对国内外研究的不足,本文以坐标网格的方式划分甲板空间,以最小化装卸过程中产生的移货代价为目标,利用先制订后优化的思路研究汽车专运船单层甲板多港装卸时的配载问题.

1 汽车专运船配载问题简介

考虑车辆的均质货特性,本文不考虑配载方

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-09-26.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132019313,3132019306);2018 年大连市科技创新军民融合专项资金资助项目(36602104).

作者简介: 孙霄峰^{*}(1978-),男,副教授,E-mail: xfsun_dlmu@163.com;沈 晔(1993-),男,助理工程师,E-mail: 18840846920@163.com.

案对船舶浮态、稳性和强度的影响,且根据汽车专运船运输的特点,规定装货和卸货不在同一个港口进行,即船舶先经过所有装货港,后经过所有卸货港.同时,为简化汽车专运船的配载问题,本文作出如下假设:

- (1)车辆在甲板上的投影为矩形,称为“车辆矩形”;
- (2)装载车辆均沿船长方向积载;
- (3)车辆只能以平移的方式移动.

同时,为便于描述问题,本文将装卸港相同、车辆矩形相同的车辆归为同一车辆种类.利用简易配载图对配载问题进行说明,如图 1 所示.

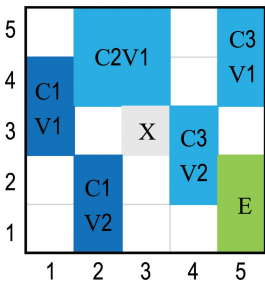


图 1 简易配载图

Fig. 1 Single stowage plan

图 1 中标注“E”的矩形表示甲板的进出口;标注“X”的矩形表示甲板上的障碍物;标注“C * V * ”的矩形表示甲板上该处装载的车辆,其上标注的数字为每辆车的编号,例如 C1V2 表示该车是种类编号为 1 的货物中的第 2 辆车.以左下角坐标为原点(1,1),以向右为横轴正方向,以向上为纵轴正方向建立甲板坐标系.用 (i,j) 表示配载图中的每个坐标,用车辆左下角所在的坐标表示车辆的位置.

本文首先根据甲板信息和车辆信息建立甲板模型和车辆模型,步骤如下:

(1)确定坐标网格尺寸.坐标网格尺寸划分得越小,配载方案制订算法的工作量就会越大.本文根据车辆的信息确定坐标网格尺寸,使不同的车辆矩形能以尽可能少的整数个坐标网格拟合.

(2)建立甲板模型和车辆模型.利用坐标网格尺寸根据甲板的形状、障碍物以及甲板绑扎孔的分布构建甲板模型,根据车辆矩形的尺寸构建车辆模型.

在以上假设条件下,本文根据 GRASP (greedy randomized adaptive search procedures)

算法生成初始配载方案,最后利用 ALNS(adaptive large neighborhood search)算法对配载方案进行优化,在优化时采用 Dijkstra 算法计算配载方案产生的移货代价,流程如图 2 所示.

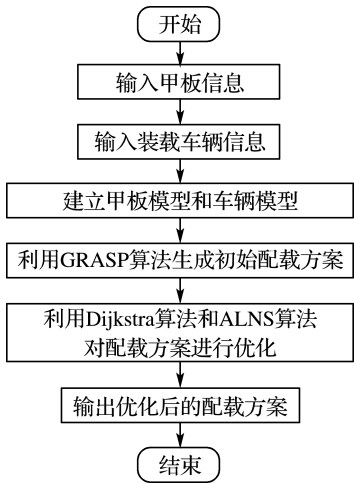


图 2 算法整体流程

Fig. 2 Overall flow of the algorithm

2 基于 GRASP 算法生成初始配载方案

2.1 GRASP 算法流程

不考虑移货代价,仅根据甲板空间规划车辆的摆放位置属于不规则板材的矩形排料问题^[6]. Hansen 等^[5]指出,利用 GRASP 算法解决此类问题时具有快速、高效的优点.

GRASP 算法^[7]是一种用来求解组合优化问题的启发式算法,该算法构造初始解的机制如下:

算法通过不断的迭代构造初始配载方案,在每次迭代中首先确定甲板遍历方向和限制候选列表 RCL(restricted candidate list)的长度,在此基础上遍历甲板坐标,直到所有坐标都被遍历为止.

在每个坐标处,根据贪婪函数生成包含若干车辆种类的有序列表 G ,然后从 G 中按照顺序选取一定数量的元素加入限制候选列表,最后再从限制候选列表中随机选择一个车辆种类,将这种车辆中的一辆车插入该坐标处.

当每次迭代结束时,算法将本次迭代结果与上次迭代进行对比,如果本次迭代未能放入甲板的车辆面积与上次迭代不相等时,更新方向调整因子 U_d 和限制候选列表长度调整因子 U_r .

算法直到某次迭代完成所有车辆的插入或达

到设置的最大迭代次数 $I_{\max}$ 时终止,其中 $I_{\max}$ 根据经验确定.

GRASP 算法的具体流程如图 3 所示,其中 $R_{\max}$ 为限制候选列表长度控制变量 N 的选取上限, u 为 U_d 和 U_r 中概率的调整值.

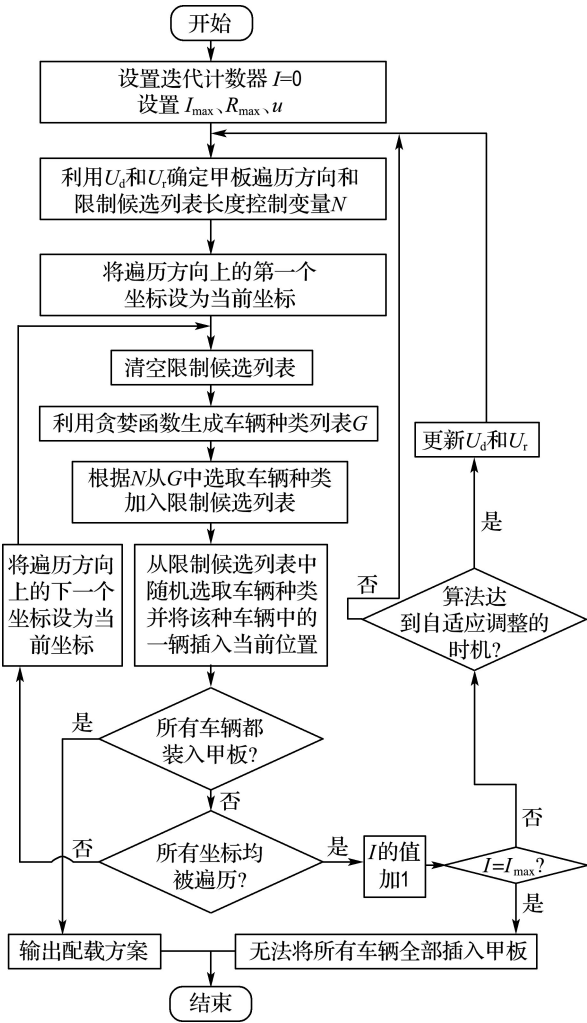


图 3 GRASP 算法流程

Fig. 3 GRASP algorithm flow

2.2 贪婪函数

贪婪函数是决定算法性能好坏的重要因素,作用是在遍历到每个坐标时对每种车辆进行评估,以便选取车辆种类加入限制候选列表,具体步骤如下.

贪婪函数在遍历到每个坐标时进行判断:首先观察当前坐标周围是否存在障碍物和障碍车辆;然后根据车辆的尺寸判断能否将每种车辆放置在此处,使车辆的左下角坐标刚好位于当前坐标;最后将可以插入此处的车辆种类按照单车面

积以降序排列,生成列表 G .

2.3 甲板的遍历方向

甲板的遍历方向决定该次构造过程中以何种方向搜索甲板的每一个坐标.遍历方向有 8 种,分别用①到⑧的编号表示,每个方向以离序号最近的坐标为搜索起点,首先沿实线箭头所指方向进行遍历,在遍历到甲板模型边界时向虚线箭头所指的方向沿下一行或下一列继续遍历,遍历沿 S 形方向进行,如图 4 所示.

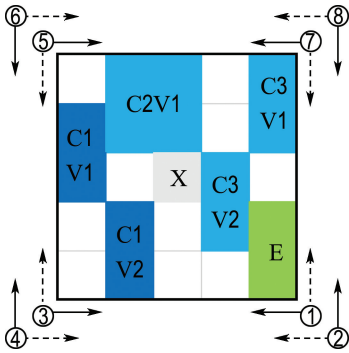


图 4 甲板坐标搜索方向

Fig. 4 Deck coordinate search direction

本文利用方向调整因子 U_d 决定遍历方向: U_d 是 8 个方向被选取概率的集合,其中所有方向被选取概率的总和为 1. 初始值见下式:

$$U_d = \left\{ \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8} \right\} \quad (1)$$

算法利用 U_d 在每次迭代时通过轮盘赌^[8]的方式选择以何种方向遍历甲板.

2.4 限制候选列表

限制候选列表是每个坐标处可装载车辆种类的容器,利用长度控制变量 N 控制算法的贪婪程度.

算法在遍历到每个坐标时从列表 G 中选取前 N 项加入限制候选列表,之后从限制候选列表中随机选取一个车辆种类,将该种车中的一辆插入当前遍历坐标.

N 为从 1 到车辆种类总数之间的整数,其值控制算法的贪婪程度.当 N 为 1 时,选择最符合贪婪要求的车辆种类进行插入,此时算法完全贪婪;当 N 为车辆种类总数时,相当于在所有车辆种类中进行随机选择,此时算法完全随机.

本文利用限制候选列表长度调整因子 U_r 决定 N 的取值:设置 N 的选取上限 $R_{\max}$. U_r 是 1 到

$R_{\max}$ 之间每个整数被选取概率的集合,其中所有项之和为1,初始值见下式:

$$U_r = \left\{ \frac{1}{R_{\max}}, \frac{1}{R_{\max}}, \dots, \frac{1}{R_{\max}} \right\} \quad (2)$$

其中 $R_{\max}$ 的值根据经验确定。

利用 U_r , 以轮盘赌^[8]的方法决定 N 的值。

2.5 自适应调整策略

当每次迭代结束时,算法将本次迭代结果与上次迭代的进行对比,如果本次迭代未能放入甲板的车辆面积与上次迭代的不相等时,更新方向调整因子 U_d 和限制候选列表长度调整因子 U_r 。

利用 $U_d[*]$ 和 $U_r[*]$ 表示 U_d 和 U_r 中的第 $*$ 项。当本次迭代未能放入甲板的车辆面积小于上次迭代时,说明本次迭代选取的遍历方向和 N 的取值较优,得到本次遍历中方向的编号 d_1 和 N 的取值 r_1 ,将 $U_d[d_1]$ 和 $U_r[r_1]$ 增加 u , U_d 和 U_r 中其余项减少某个相同的值,以保证概率的总和为1,其中 u 是概率的调整值,其值根据经验确定。

同理,当本次迭代未能放入甲板的车辆面积大于上次迭代的结果时,将 $U_d[d_1]$ 和 $U_r[r_1]$ 减少 u , 将 U_d 和 U_r 中其余项增加某个相同的值,以保证概率的总和为1。

3 基于 Dijkstra 算法的移货代价计算

3.1 移货代价

车辆在装卸过程中可能会受到其他车辆的阻碍,需要事先将这些车辆移除才可以装卸。当采取最合理的路径装卸某一车辆时,被移除的其他车辆的占地面积称为装卸该车辆的移货代价。

同一种类车辆同时装船或卸载时的移货代价计算问题是进出口节点到多个车辆位置节点的最短路径问题,属于单节点到多节点的最短路径问题,其中路径长度用车辆装卸产生的移货代价表示,本文采用 Dijkstra 算法进行求解。

3.2 利用 Dijkstra 算法求移货代价

Dijkstra 算法以起始点为中心向外层层扩展,直到扩展到终点为止,算法最终得到一个最短路径树。该算法性能稳定,时间复杂度为 $O(n^2)$, 在网络节点较少时效率较高^[9]。

若图1所示的配载图中只有种类编号为1的车辆在当前港口装船,而其他车辆在到达该港之前就已经绑扎在甲板上,则在船车辆可能会阻碍种类编号为1的车辆装船。

设种类编号为1的车辆装船产生的移货代价矩阵和移除车辆矩阵分别为 E 和 S , 矩阵与配载图的网格划分相对应。设矩阵中的元素为 $E[i][j]$ 和 $S[i][j]$, 与配载图中的坐标 (i, j) 对应。 E 中各元素的初始值设置为无穷大,标记为 ∞ ; S 中各元素的初始值设置为空集,标记为 $\emptyset$ 。

按照图4中方向①对甲板坐标进行遍历,表示编号为1的车辆驶至遍历的坐标处。 E 和 S 的更新步骤如下:

(1)更新第一个节点。当装船车辆驶至第一个坐标 (i_0, j_0) 时,如果没有受到车辆阻碍,不更新 S , 更新使 $E[i_0][j_0] = 0$; 如果受到车辆阻碍,则用阻碍车辆的编号更新 $S[i_0][j_0]$, 并用阻碍车辆所占的坐标网格数更新 $E[i_0][j_0]$ 。然后对第一个节点的每个相邻可到达节点按照如下方法进行更新:

设更新的下一个节点为 (i_1, j_1) ;

①如果车辆无法驶至 (i_1, j_1) , 不更新矩阵;

②如果车辆可以驶至 (i_1, j_1) , 且不需要移除别的车辆,更新使 $E[i_1][j_1] = E[i_0][j_0]$, $S[i_1][j_1] = S[i_0][j_0]$;

③如果车辆可以驶至 (i_1, j_1) , 但需要移除别的车辆,设被移除车辆所占的网格数为 c , 当 $E[i_1][j_1] > c + E[i_0][j_0]$ 时,更新使 $E[i_1][j_1] = c + E[i_0][j_0]$, 并使 $S[i_1][j_1]$ 更新为 $S[i_0][j_0]$ 中车辆和新移除的车辆的集合,否则不更新。

(2)更新后续节点。按照遍历方向分别到达剩下的所有可到达节点,在到达每个节点时按照(1)中①②③的思路对当前遍历方向的前、左、右方向的节点进行更新。

按照上述思路完成车辆驶至所有可到达节点时的更新过程。更新后的移货代价矩阵和移除车辆矩阵见式(3)和式(4)。

根据配载图得到该种车辆在甲板上的定位,然后从移除车辆矩阵中得到车辆装船需要移除的车辆和产生的移货代价。对于本例,种类编号为1的车辆位于坐标(1,3)和(2,1)处,根据移除车辆矩阵可知需要移除车辆 C3V2, 产生的移货代价为2个网格。

$$E = \begin{pmatrix} \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 2 & 6 & 6 & 2 & 2 \\ 2 & 6 & \infty & 2 & 2 \\ 2 & 2 & \infty & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \{C3V2\} & \{C2V1, \{C2V1, \\ & C3V2\} & C3V2\} & \{C3V2\} & \{C3V1\} \\ \{C3V2\} & \{C2V1, \\ & C3V2\} & \emptyset & \{C3V2\} & \{C3V1\} \\ \{C3V2\} & \{C3V2\} & \emptyset & \{C3V2\} & \emptyset \\ \{C3V2\} & \{C3V2\} & \{C3V2\} & \{C3V2\} & \emptyset \end{pmatrix} \quad (4)$$

3.3 计算配载方案的移货代价

计算配载方案移货代价的流程如图 5 所示. 配载方案的移货代价由每个挂靠港产生的移货代

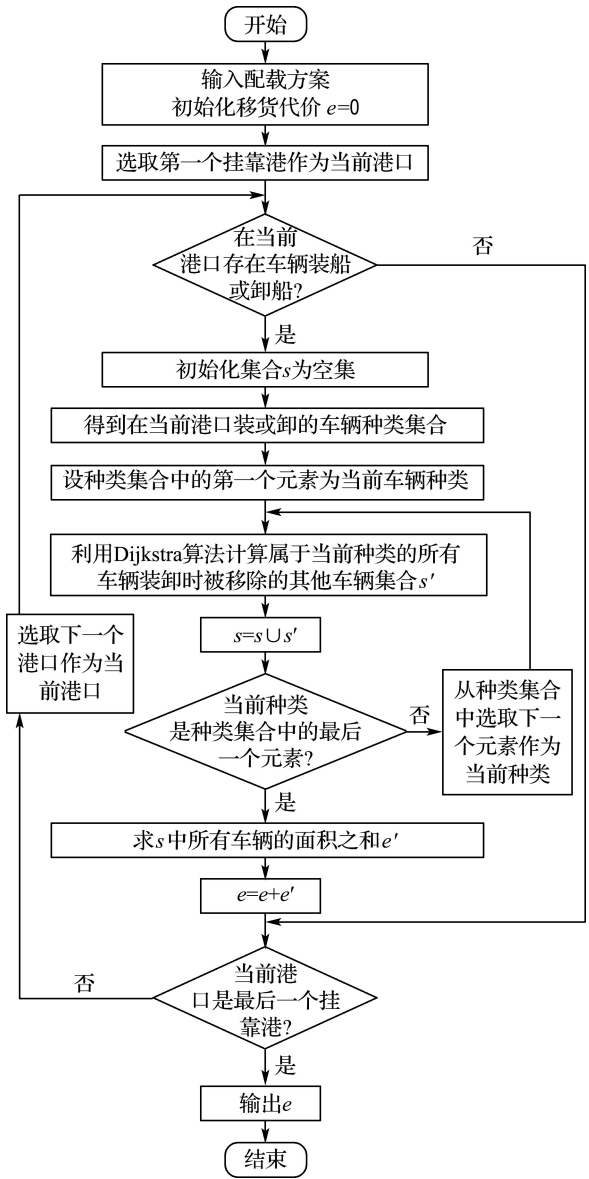


图 5 配载方案产生的总移货代价计算流程

Fig. 5 The flow of calculating shifting cost of a stowage plan

价组成. 在计算每个挂靠港产生的移货代价时, 需要首先得到在该港装卸的车辆种类, 然后利用 Dijkstra 算法求这些种类中所有车辆装卸时被移除的其他车辆, 最后除去被移除车辆中的重复项, 汇总得到被移除车辆总面积, 即为该港产生的移货代价.

4 利用 ALNS 算法优化配载方案

虽然 GRASP 算法的第二个阶段可对初始解进行优化, 但 Hansen^[10] 研究发现 ALNS 算法比 GRASP 算法的第二阶段优化效果更好, 因此本文采用 ALNS 算法进行配载方案的优化.

ALNS 算法由 Ropke 等^[11] 提出, 属于改进性启发式算法. 算法在每次迭代中首先根据动态权重选取破坏策略和修复策略, 然后利用选取的策略将配载方案中的部分车辆移除并重新插入, 从而逐步对配载方案进行优化.

4.1 破坏策略

针对汽车专运船车辆配载, 破坏策略利用不同的方式选取并移除配载方案中的部分车辆, 包括:

(1) 随机移除策略. 从配载图中随机选取占车辆总数比例为 k 的车辆移除. 本策略能降低局部最优解出现的可能性^[12].

(2) 矩形移除策略. 从甲板上随机选取一块面积与甲板总面积的比例为 k , 且长宽比和甲板长宽比相同的矩形区域, 然后将该区域内的所有车辆移除, 以便对该区域的车辆排列顺序进行优化.

(3) 非邻接移除策略. 将相邻车辆中没有与它具有相同装货港或卸货港的车辆移除, 后续的修复过程可以增加装货港或卸货港相同的车辆相邻放置比例.

(4) 港口移除策略. 从挂靠港中随机选取某个港口, 将在该港口装卸的所有车辆移除的同时从甲板上剩余的车辆中随机选取一部分车辆移除. 本策略实施之后, 修复策略可以增加装货港或卸货港相同的车辆放置在一起的比例.

(5) 移货代价移除策略. 将移货代价较高的部分车辆移除. 通常离甲板进出口较远的车辆的移货代价较高, 将移货代价较高的车辆进行重新排序可能会很大地提升配载方案的质量. 首先选取装船移货代价或卸船移货代价较高的部分车辆移

除,然后移除甲板进出口附近的车辆,两次移除车辆数占总数的比例分别为 k 和 l .

(6)移货贡献面积移除策略.将车辆在所有挂靠港被移除的频次乘以车辆所占的坐标网格数称为移货贡献面积.首先利用 Dijkstra 算法统计整个航次下每辆车被移除的频次,然后求得每辆车的移货贡献面积,最后按照降序将占总数比例为 k 的车辆移除,同时将甲板进出口附近占总数比例为 l 的车辆移除.

其中,破坏策略中的参数 k 和 l 根据经验确定.

4.2 修复策略

修复策略旨在利用不同的插入方式将被移除的车辆重新插入,包括:

(1)随机插入策略.本策略将被移除的车辆随机插入到甲板空位中,能在一定程度上降低局部最优解出现的可能性,有助于算法跳出局部最优.

(2)邻接插入策略.尽可能地将被移除的车辆插入到同种类车辆旁边,以便提高装卸的效率.

(3)港口跨度插入策略.本策略将被移除车辆中装货港和卸货港跨度较大的车辆放置在远离甲板进出口的位置,将装货港和卸货港跨度较小的车辆放置在靠近甲板进出口的位置.

(4)GRASP 插入策略.该策略遍历甲板空位,在当前遍历位置上尽可能插入占坐标网格数较多的车辆,能在一定程度上避免算法陷入局部最优.当甲板形状极其复杂或装载车辆的大小形状极其繁杂时,前几种修复策略有一定的失败概率,不能保证全部车辆都能插入到甲板上,此时需要利用 GRASP 插入策略进行修复,保证所有车辆都能插入甲板.

4.3 判断是否接受对配载方案的处理

当经过破坏和修复处理之后构造出的新配载方案比处理之前的配载方案产生更少的移货代价时,说明配载方案得到了优化,此时用新配载方案代替旧配载方案继续进行优化;但当构造出的新配载方案产生的移货代价不比处理之前的配载方案少时,利用模拟退火算法^[13]判断是否接受较差的结果.

模拟退火算法是一种通用的概率演算法,其出发点是基于物理学中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性.目前大部分

ALNS 算法都采用模拟退火算法判断是否接受劣解.

如果新配载方案 X' 产生的移货代价与当前最优解 X 相同或比 X 多,那么以概率 p 接受新解, p 的设置方法如下:

$$p=\exp(-(F(X')-F(X))/T)$$
 (5)

其中函数 F 表示配载方案产生的移货代价, T 是模拟退火的当前温度,设置方法如下:

$$T=-\frac{\tau}{\ln \theta}F(X)$$
 (6)

其中 τ 为目标函数的退化系数, θ 为接收解的概率,二者的值根据经验确定.

4.4 策略的选取方法

ALNS 每次迭代都按照轮盘赌^[8]的机制根据权重选取破坏策略和修复策略.算法会根据每个破坏策略或修复策略表现的好坏调整策略被选择的概率.本文利用 Ropke 等^[11]提出的方法进行自适应权重调整.

将 ALNS 算法的整个迭代过程进行分段,每段包含 M 次迭代.对每段迭代进行如下处理:

首先将每个破坏策略和修复策略的积分器初始化为零,其次得到本段迭代每个破坏策略和修复策略的选取权重,然后在每次迭代时利用选取权重以轮盘赌^[8]的方式分别选取破坏策略和修复策略对配载方案进行优化,接着根据优化结果对本次迭代进行评分,并将得分累加至采用的破坏策略和修复策略的积分器,最后在每段迭代结束之后根据积分器对所有策略的选取权重进行更新,更新后的权重用于下个分段.其中,在第一段迭代中每个破坏策略和修复策略的选取权重都为 1.

评分方式见表 1.

表 1 破坏策略和修复策略的得分方式

Tab. 1 Scoring methods of destruction and reconstruction strategies

分数	得分方式
σ_1	经过破坏修复处理后的方案是目前产生移货代价最少的方案
σ_2	经过破坏修复处理后的方案比前一个方案产生的移货代价少
σ_3	经过破坏修复处理后的方案被模拟退火算法接受
σ_4	其他情况

算法按照表 1 中得分方式的顺序判断经过破

坏和修复之后的配载方案首先满足哪一种得分方式,然后对采用的破坏策略和修复策略评分.需要注意的是算法的每次迭代采用了一种破坏策略和一种修复策略,而得分是这两种策略共同作用的结果.因此,在每次迭代中破坏策略和修复策略得分相同.破坏策略和修复策略选取权重的更新公式如下:

$$w_a=w'_a(1-\eta)+\eta\frac{\pi_a}{\beta_a}$$

(7)

式中: a 是每个破坏策略和修复策略的编号,值为 1 到 6 时表示每个破坏策略的编号,值为 7 到 10 时表示每个修复策略的编号; w'_a 是本段迭代中每个策略的选取权重; w_a 是重新确定的策略选取权重,用于下段迭代; π_a 是本段迭代中每个策略的积分器; β_a 是该分段中策略 a 被调用的次数; η 控制策略调整的速度,当 $\eta=0$ 时不进行自适应调整,每个因子的选取权重保持初始值,当 $\eta=1$ 时,下个分段中策略的选取权重完全取决于当前分段中每个策略的表现,而和当前分段中策略的选取权重无关.

算法中 M 、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 、 η 的值根据经验确定.

4.5 算法终止条件

算法的终止条件如下:

(1)当迭代产生移货代价为零的配载方案时,输出配载方案,算法结束.

(2)当迭代产生移货代价不为零的配载方案时:算法设置一个合理的阈值 φ ,当 β 次迭代之内配载方案移货代价的移动极差^[14]小于 φ 时,输出本次迭代的配载方案,算法结束.其中,移动极差指多次连续迭代中配载方案移货代价的最大值与最小值之差, β 和 φ 的值根据经验确定.

(3)算法设置终止迭代次数 λ ,当迭代产生的配载方案不满足上述两个条件时,如果迭代次数 Ω 达到了 λ ,那么输出配载方案,算法结束.

4.6 ALNS 算法流程

算法以初始配载方案作为输入,然后在每次迭代中通过选取不同的破坏策略和修复策略对配载方案进行逐步改进,直到找到最优配载方案.以 M 次迭代为一段,每段迭代中策略的选取权重相同.在每次迭代中首先根据权重选取破坏策略和修复策略对配载方案进行处理,然后根据处理之

后配载方案的移货代价对策略进行评分,最后将分数累加至每个策略的积分器.当每段迭代结束时,根据积分器对每个策略的选取权重进行更新,更新之后的权重用于下一段迭代.算法的流程如图 6 所示.

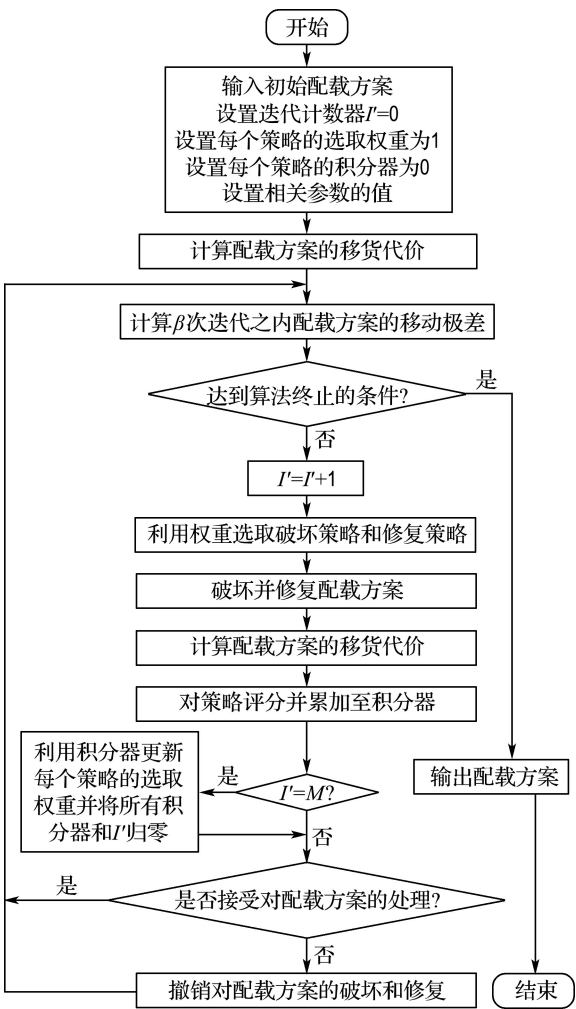


图 6 ALNS 算法流程

Fig. 6 ALNS algorithm flow

5 算 例

以上海船舶研究设计院设计的汽车专运船 VIKING CONQUEST 的主装货甲板为例,进行了优化配载实验,该船的相关信息见表 2.

表 2 VIKING CONQUEST 主尺度
Tab. 2 Principal dimension of VIKING CONQUEST

总长/ m	型宽/ m	型深/ m	设计吃 水/m	总质 量/t	车位数
199.90	32.26	14.95	9.00	62 105	6 700

该船航程总共经过 6 个港口,港口按经过的顺序分别编号为 1 到 6. 选取符合甲板高度限制的车辆装船. 车辆在港口 1、2、3 装船,在港口 4、

5、6 卸船. 装载车辆的总面积占甲板面积的 89.4%,车辆的具体信息见表 3.

表 3 装载车辆信息
Tab. 3 Loaded vehicle information

编号	车型	长度/m	宽度/m	高度/m	纵向间隔/m	横向间隔/m	装货港	卸货港	车辆数目
0	Daihatsu "MOVE-CX"	3.30	1.40	1.70	0.3	0.1	1	4	47
1	Daihatsu "MOVE-CX"	3.30	1.40	1.70	0.3	0.1	1	5	47
2	Honda "CR-V"	4.47	1.75	1.71	0.3	0.1	2	4	47
3	Honda "CR-V"	4.47	1.75	1.71	0.3	0.1	2	6	47
4	DUMP TRUCK	7.80	3.70	3.60	0.5	0.3	3	5	47
5	DUMP TRUCK	7.80	3.70	3.60	0.5	0.3	3	6	47

根据车辆信息和甲板信息确定坐标网格的尺寸为 1.2 m×0.5 m,则车型 Daihatsu "MOVE-CX"、Honda "CR-V"和 DUMP TRUCK 可分别用数量为 3×3、4×4、7×8 的坐标网格表示.

利用 C++ 编写程序生成配载方案. 其中 GRASP 算法和 ALNS 算法中的参数设置见表 4. 利用 GRASP 算法得到的初始配载方案的移货代价为 1 272 m². ALNS 算法对配载方案移货代价的优化过程如图 7 所示. 由该图可知,随着算法的进行,配载方案移货代价的降低速度放缓,最终达到算法终止的条件,输出优化后的配载方案.

表 4 相关参数设置
Tab. 4 Relevant parameters setup

算法	参数	定义	取值
GRASP	$I_{\max}$	最大迭代次数	20 000
GRASP	$R_{\max}$	限制候选列表最大长度	5
GRASP	u	概率调整值	0.05
ALNS	k	移除车辆比例	(0,0.4]中随机数
ALNS	l	补充移除比例	$k/2$
ALNS	τ	目标函数的退化系数	0.05
ALNS	θ	接收解的概率	0.5
ALNS	M	每段迭代次数	150
ALNS	σ_1	全局最优解的评分	0.35
ALNS	σ_2	局部最优解的评分	0.15
ALNS	σ_3	接收劣的评分	0.09
ALNS	σ_4	其他情况的评分	0
ALNS	η	自适应调整的速度	0.1
ALNS	φ	算法收敛阈值	1
ALNS	β	移动极差的样本数量	2 000
ALNS	λ	终止迭代次数	20 000

将本文算法配载的结果与 7 个人工配载的结果进行对比,移货代价的对比结果见图 8. 由计算结果可知,利用本文算法生成的配载方案产生的移货代价比 7 个人工配载方案中的最优方案产生的移货代价小 52.6%. 其中本文算法配载结果和人工配载 4 的示意图如图 9 和 10 所示.

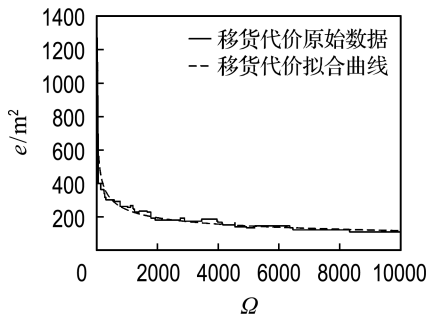


图 7 ALNS 算法的优化曲线
Fig. 7 Optimization curve of ALNS algorithm

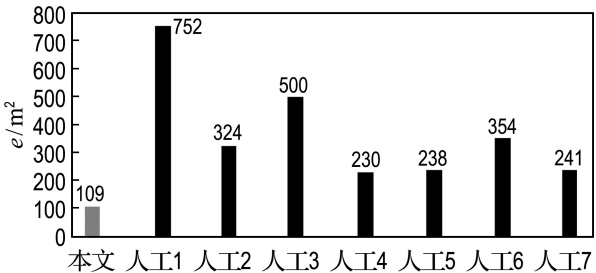


图 8 配载方案的移货代价对比
Fig. 8 Comparison of stowage plans' shifting cost

在本文算法配载结果和人工配载 4 中,对于港口 1、2、3:当船舶在 1 港时,编号为 1 的车辆先装船,编号为 0 的车辆后装船;当船舶在 2 港时,

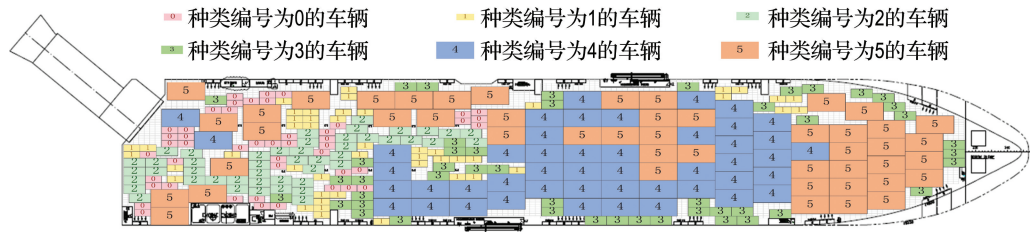


图 9 本文算法生成的配载图

Fig. 9 The stowage plan generated by the algorithm in this paper

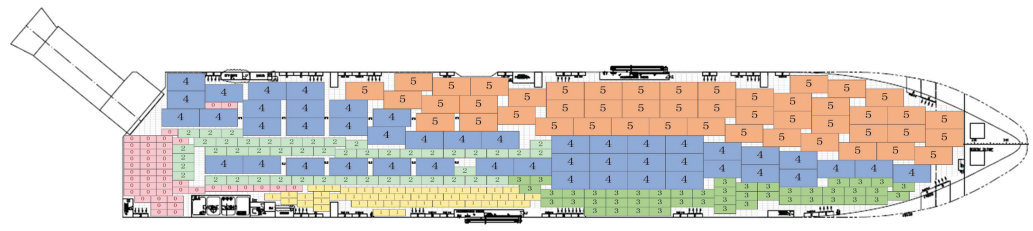


图 10 人工配载 4 示意图

Fig. 10 Schematic of manual stowage plan 4

编号为 3 的车辆先装船,编号为 2 的车辆后装船;当船舶在 3 港时,编号为 5 的车辆先装船,编号为 4 的车辆后装船.对于港口 4、5、6,车辆不按照严格的顺序进行卸载;当船舶在 4 港时,编号为 0、2 的车辆同时卸载;当船舶在 5 港时,编号为 1、4 的车辆同时卸载;当船舶在 6 港时,编号为 3、5 的车辆同时卸载.

6 结 语

本文进行了汽车专运船多挂靠港时单层甲板内车辆配载优化算法的研究,并以上海船舶研究院设计院设计的一汽车专运船为例,选取主装货甲板进行车辆配载.算法结果与 7 名有经验配载人员配载结果的比较表明本文算法生成的配载方案具有更小的移货代价,有利于提高汽车专运船的运输效率,减少人工制订配载方案的工作量,具有一定的实际应用价值.目前,本文研究仅限于单层甲板内的车辆配载,未来将进一步研究汽车专运船多层甲板装卸时的车辆配载优化问题;同时,本文研究的优化目标较少,未考虑货物装卸便利性等因素,未来将进一步研究汽车专运船多目标的配载优化问题.

参考文献:

[1] 金燕燕. 滚装船舶配载优化问题的研究 [D]. 大

连: 大连海事大学, 2011.
JIN Yanyan. An optimization model for the Ro-Ro ship loading [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
[2] 靳志宏, 杨 丹, 邱 波, 等. 多层滚装船配载优化建模与算法设计 [J]. 系统工程学报, 2013, 28(2): 218-226.
JIN Zhihong, YANG Dan, QIU Bo, *et al.* Effective model and algorithm for multilayer ro-ro ship loading [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(2): 218-226. (in Chinese)
[3] 权义柯. 滚装船车辆配载优化与系统实现 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
QUAN Yike. The optimization and implementation of Ro-Ro vehicle stowage system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
[4] ØVSTEBØ B O, HVATTUM L M, FAGERHOLT K. Optimization of stowage plans for RoRo ships [J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(10): 1425-1434.
[5] HANSEN J R, HUKKELBERG I, FAGERHOLT K, *et al.* 2D-Packing with an application to stowage in Roll-on Roll-off liner shipping [C] // 7th International Conference on Computational Logistics, ICCL 2016. Berlin: Springer Verlag, 2016: 35-49.
[6] LIU Jingfa, LI Jian, LU Zhipeng, *et al.* A quasi-

human strategy-based improved basin filling algorithm for the orthogonal rectangular packing problem with mass balance constraint [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2017, **107**: 196-210.

[7] ALONSO M T, ALVAREZ-VALDES R, PARREÑO F. A GRASP algorithm for multi container loading problems with practical constraints [J/OL]. 4OR-A Quarterly Journal of Operations Research, 2019. [2019-01-01]. <https://doi.org/10.1007/s10288-018-0397-z>.

[8] 马洁莹. 基于轮盘赌策略的混沌萤火虫算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

MA Jieying. Research on chaotic firefly algorithm based on roulette wheel selection strategy [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)

[9] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. **Numberische Mathematik**, 1959, **1**(1): 269-271.

[10] HANSEN J. A heuristic approach to the two-dimensional roll-on roll-off liner shipping stowage problem [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2016.

[11] ROPKE S, PISINGER D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows [J]. **Transportation Science**, 2006, **40**(4): 455-472.

[12] PISINGER D, ROPKE S. A general heuristic for vehicle routing problems [J]. **Computers & Operations Research**, 2007, **34**(8): 2403-2435.

[13] STEINBRUNN M, MOERKOTTE G, KEMPER A. Heuristic and randomized optimization for the join ordering problem [J]. **The VLDB Journal**, 1997, **6**(3): 191-208.

[14] 王 灿,刘畅辉,刘建峰,等. 基于数据驱动的船体板件数控等离子切割精度控制 [J]. 船舶工程, 2018, **40**(11): 23-26,32.

WANG Can, LIU Changhui, LIU Jianfeng, *et al*. Precision control of NC plasma cutting for hull plates based on data driven [J]. **Ship Engineering**, 2018, **40**(11): 23-26,32. (in Chinese)

PCTC stowage optimization with single deck

SUN Xiaofeng^{*1}, SHEN Ye², XU Xin'ao¹, YIN Yong¹

(1. Key Laboratory of Marine Simulation and Control for Ministry of Communications, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract: To reduce the shifting cost caused by unreasonable vehicle arrangement in the deck of pure car truck carrier (PCTC) for single deck and multiple ports, heuristic algorithms were adopted to formulate the optimized loading plan step by step. Firstly, the coordinate grid model of the deck and vehicles was established; Secondly, GRASP (greedy randomized adaptive search procedures) was used to insert the vehicle into the deck to generate the initial stowage plan; Finally, ALNS (adaptive large neighborhood search) algorithm and Dijkstra algorithm were used to improve the stowage plan. Taking VIKING CONQUEST designed by Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute as an example, the main cargo deck was selected to formulate the stowage plan. Comparing the stowage plan with 7 manual stowage plans, the results show that the stowage plan generated by proposed algorithm has a lower shifting cost, which is helpful to improve the transportation efficiency of PCTC.

Key words: waterway transportation; pure car truck carrier (PCTC); multiple loading/unloading ports; stowage optimization; GRASP algorithm; ALNS algorithm