

文章编号:1000-4653(2025)02-0072-08

考虑港口库存的商品车滚装船 路径与配载协同优化

杨华龙, 苗文琦, 孙奕伦, 文 明
(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要:针对商品车滚装船配送问题,考虑航次各需求港期初库存水平,提出了商品车滚装船在多个航次计划期内灵活挂靠港口的航行策略,构建了滚装船路径与配载协同优化模型,并设计了改进遗传算法求解。算例结果表明:灵活挂靠港口的航行策略可以减少1.9%的滚装船配送总成本,在同一条航线上,大型与小型滚装船往返航次燃油消耗约有4%的差异。安排不同型号的滚装船配送亦可有效降低总成本;在安全库存设置为适度水平时,船公司计划期的总成本最低。研究结论可为船公司商品车滚装船配送决策提供有益参考。

关键词:商品车滚装船; 路径与配载; 协同优化; 港口库存; 改进遗传算法

中图分类号:U268.6 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.010

Collaborative optimization of routing and stowage for commodity vehicle RoRo ships considering port inventory

YANG Hualong, MIAO Wenqi, SUN Yilun, WEN Ming

(Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This paper studied the problem of distributing commodities for RoRo ships. Taking into account the initial inventory level at each demand port, the paper proposes a flexible calling strategy for RoRo ships transporting commodity vehicles within multiple voyage planning periods. A collaborative optimization model for routing and stowage was established for RoRo ships, and an improved genetic algorithm was designed to solve it. The results of the numerical example demonstrate that this flexible calling strategy can reduce the total distribution cost of RoRo ships by 1.9%. There is a difference of about 4% in fuel consumption between large and small RoRo ships for round-trip voyages on the same route. Shipping companies can also reduce total costs by arranging different types of RoRo ship for distribution. When the safety stock is set to a moderate level, the total cost during the planning period is minimized. These research conclusions can provide a useful reference for shipping companies when making decisions about the distribution of commodities with RoRo ships.

Key words: commodity vehicle RoRo ship; routing and stowage; collaborative optimization; port inventory; improved genetic algorithm

滚装船(Roll-on & Roll-off Ship, RoRo Ship)是目前世界海运市场中的热点船型^[1],其凭借运量大、安全性高、经济环保等优势在商品车物流中扮演着重要角色。滚装船配送已成为商品车销售物流中的重要环节。在商品车滚装船配送中,船公司需要

解决两个相互关联的决策问题,一是选择滚装船航次挂靠的港口(路径),二是选择滚装船配送的商品车并确定其在船上的装载位置(配载)。由此产生了复杂的商品车滚装船路径与配载(RoRo Ship Routing and Stowage, RSRS)多重离散组合优化问

收稿日期:2024-02-14

基金项目:国家自然科学基金(72071024)

作者简介:杨华龙(1964—),男,博士,教授,研究方向为海运物流与供应链管理, E-mail: hlyang@dlmu.edu.cn.

引用格式:杨华龙,苗文琦,孙奕伦,等.考虑港口库存的商品车滚装船路径与配载协同优化[J].中国航海,2025,48(2):72-79.

YANG H L, MIAO W Q, SUN Y L, et al. Collaborative optimization of routing and stowage for commodity vehicle RoRo ships considering port inventory[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 72-79. (in Chinese)

题^[2]。这既是与普通车辆路径问题的显著区别,也是商品车滚装船配送的难点所在。因此,不确定需求下的商品车 RSRs 协同优化是一项具有挑战的研究课题。

滚装船运输既有不定期船运输的航线灵活性特点,又有定期船(班轮)运输船期固定的特征。由于在各航次中载运的各类商品车在质量和体积等方面存在明显差异,船舶航次配载是滚装船运输决策中的核心问题^[3],一直以来也是学界研究的热点问题。滚装船通常具有重心高、稳定性差等特点^[4],为了确保在恶劣海况下船舶也能平稳地装卸,JE-SUS 等^[5]开发了滚装船全自动积载技术,有效提升了甲板配载效率。靳志宏和金燕燕^[6]针对单层甲板和单装单卸港情形,建立了船公司运费收入最大化为目标的滚装船配载优化模型。在此基础上,靳志宏等^[7]进一步针对多层甲板和单装单卸港滚装船配载问题,开发了考虑船舶舱容限制的配载优化模型,并设计了两阶段启发式算法,用大规模数值验证了模型及算法的有效性。考虑到滚装船多港挂靠的现实场景,孙霄峰等^[8]针对单层甲板和多港挂靠情形下的滚装船配载问题,建立了甲板和装载车辆坐标网格模型,以减少多港装卸下由于汽车专运船单层甲板内部不合理的车辆摆放顺序而造成的移货成本。OVSTEBO 等^[9]构建了多层甲板和多港挂靠滚装船配载优化模型,并设计了基于贪婪规则的启发式算法。姜彦宁等^[10]开发了基于 VB 语言的多层甲板和多港挂靠滚装船配载管理信息系统,为滚装船实时配载决策提供了便捷的方法。考虑到大型滚装船运输多种类型商品车的特点,孙霄峰等^[11]建立了商品车自动配载模型,初步解决了大型汽车滚装船车辆的自动配载问题。

上述文献对滚装船配载问题的研究均是在假定滚装船航行路径和挂靠港口固定条件下展开的。随着近年来商品车供应链协同配送的不断发展,船公司纷纷与汽车制造商签署商品车配送合作协议,船公司负责商品车的海上运输和需求港的库存管理。此时,滚装船运输收益既定,运输成本最小化便成为船公司优化决策的目标。为此,许多学者对滚装船运输(路径)组织决策优化问题进行了研究,如 BO 等^[12]依据船公司与汽车制造商签署长期合作协议,设计了商品车滚装船海运配送网络,以便从战略层面实现船公司总成本最小化目标。HENRIK 等^[13]依据滚装船航速对船期及燃油消耗的影响关系,构建了滚装船每隔一定时期(中期)的航线配船与航速集成优化模型。考虑到滚装船配送不同类型商品

车的质量和体积等差异因素,OVSTEBO 等^[14]将商品车滚装船航行路径与配载问题相结合,构建了滚装船路径与配载协同优化模型。但该研究仍是在假定一定时期内滚装船各航次需求稳定的条件下,从战术层面解决商品车滚装船路径与配载协同优化问题,并未考虑在滚装船具体航次配送决策时,因需求不确定而导致的各港各类商品车期初库存变化对滚装船配送路径、配送量、配载方案等产生的影响,故优化结果并不适用于大多数需求波动的现实场景。

在需求不确定情形下,滚装船配送业务与车辆配送业务类似,存在着路径和配载协同优化问题^[15],如在滚装船一个往返航次中,若某港商品车期初库存量大于需求量,则滚装船本航次可以不挂靠该港。有鉴于此,不同于已有的战略或战术层面研究,本文从滚装船航次运营层面,针对需求不确定下的商品车 RSRs 协同优化问题进行了扩展研究。本文的主要贡献如下:1)依据不确定需求下各港各类商品车航次期初库存水平,在航次运营层面,将商品车滚装船配送路径问题与配载问题加以集成,以实现商品车滚装船配送的全局优化目标;2)提出了一种根据航次各港各类商品车期初库存量和需求量,安排滚装船航次灵活挂靠港口的办法,并结合滚装船横/纵倾力矩及重心、稳性等安全要求,设置商品车滚装船配载约束,构建了定期配送下航次单程灵活挂靠港口的商品车 RSRs 协同优化模型,以实现船公司总成本最小化目标;3)结合不确定需求下商品车 RSRs 问题特性,将贪婪算法思想与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)融合,运用启发式规则以划分甲板车道的方式将商品车排列摆放,改变传统 GA 中初始种群的选择和变异方式,设计改进的遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA),这既符合现实情境又极大缩短了算法运行时间,且具有潜在并行性和良好收敛性。

1 问题描述

假设某船公司与汽车制造商签署商品车滚装船配送服务长期合作协议,基于定期补货策略,船公司安排滚装船定期地从供给港车辆配送中心(Vehicle Distribution Center, VDC)将商品车运至需求港车辆储存中心(Vehicle Storage Center, VSC),以满足客户需求。滚装船一个往返航次航线去程依次从大连、天津、上海、厦门和广州各港 VDC 装载各类商品车,分别运送至天津、上海、厦门、广州和海口各港 VSC,回程则依次从海口、广州、厦门、上海和天津各港 VDC 装载各类商品车,分别运送至广州、厦门、上

海、天津和大连各港 VSC。

在滚装船一个往返航次时间构成的决策期内,若需求港 VSC 某类商品车的期初库存量不小于决策期内的需求量,则不需要配送该类商品车到需求港 VSC。同样地,若由供给港 VDC 提供给需求港 VSC 的某类商品车的期初库存量均不小于决策期内的需求量,则不需要到该供给港 VDC 载运该类商品车。当需求港 VSC 某类商品车需求不确定,且其概率分布未知时,根据随机需求下的风险控制原理,船公司可通过保守系数,将不确定需求转换为确定值,以便制定滚装船的航次配送路径(确定挂靠港口及船舶航速)和配载方案(确定载运商品车类型、数量及在船上放置位置等)。

此外,由于商品车的均质货物特性,虽然滚装船装载的商品车总质量通常不会超出其载重量限制,但需要考虑其航行安全因素。例如,当甲板左右某侧放置车辆太多,会产生船舶横倾角过大,容易造成船舶侧翻;当甲板前后某侧放置车辆太多,会产生船舶纵倾角过大,容易造成船舶前后吃水不平衡,增大航行阻力;当上下某层甲板放置车辆太多,会产生船舶重心偏离,容易造成船舶稳性下降。

综合上述商品车滚装船配送中的经济性和安全性因素分析可知,定期配送下的商品车 RSRs 协同优化问题的实质是,在满足客户需求和保证滚装船航行安全的前提下,针对各港 VSC 各类商品车的不确定需求,船公司在获取航次各港 VSC 各类商品车的期初库存水平的基础上,通过设置保守系数,确立满足各港 VSC 各类商品车不确定需求预算阈值的约束条件,将滚装船航次路径和配载方案加以有效集成,建立商品车 RSRs 协同优化模型,确定滚装船航次挂靠港口、在各航段的航速、由各港 VDC 向各港 VSC 配送商品车的种类、数量及在船上存放的位置,以实现船公司商品车配送总成本最小化的目标。

为了便于问题求解,本文结合实际做以下假设:

- 1) VDC 的商品车库存充足且不考虑其库存成本;
- 2) 同一方向港口没有转运情况;
- 3) 甲板形状是矩形;
- 4) 滚装船在航次的去程和回程始发港口先卸空、后装载。

2 模型构建

由上述问题描述可知,不确定需求下的商品车 RSRs 协同优化问题的目标是实现船公司商品车配送总成本最小化,需要满足的约束条件应包括:滚装

船一个往返航次时间约束、航行速度约束、挂靠港口和航线连接约束、滚装船甲板容量约束、需求港 VSC 补货量约束、滚装船横倾、纵倾和重心等航行安全约束。为此,可建立商品车 RSRs 协同优化模型 M1 如下。

目标函数:

$$\min z = \frac{PF}{24 V^3} \left(\sum_{i \in \Phi \cup \Psi} \sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} L_{ij} x_{ij} v_{ij} \right) + \sum_{i \in \Phi \cup \Psi} G_i y_i + \sum_{i \in \Phi \cup \Psi} \sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} C_h q_{ijhek} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in \Phi \cup \Psi} \sum_{j \in \Phi \cup \Psi, j \neq i} \frac{L_{ij}}{V_{ij}} x_{ij} + \sum_{i \in \Phi \cup \Psi} \sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} T_h q_{ijhek} \leq R \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} x_{ij} = \sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} x_{ji}, \quad \forall i \in \Phi \cup \Psi \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} x_{ij} + \sum_{j \in \Psi \cup \Phi, j \neq i} x_{ji} = 2y_i, \quad \forall i \in \Phi \cup \Psi \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \Phi \cup \Psi, j \neq i} \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek} y_i = \sum_{j \in \Phi \cup \Psi, j \neq i} \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek}, \quad \forall i \in \Phi \cup \Psi \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \Psi \cup \Phi, i \neq j} \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek} y_j = \sum_{i \in \Psi \cup \Phi, i \neq j} \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek}, \quad \forall j \in \Phi \cup \Psi \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \Psi} \sum_{j > i, h \in \Delta_i} J_h q_{ijhek} + \sum_{l \in \Phi, l < i} \sum_{j \in \Psi, j > i} \sum_{h \in \Delta_k} J_h q_{ljhek} \leq U_e, \quad \forall i \in \Phi; e \in \Omega; k \in \Theta_e \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \Phi} \sum_{j < i, h \in \Delta_i} J_h q_{ijhek} + \sum_{l \in \Psi, l > i} \sum_{j \in \Phi} \sum_{j < i, h \in \Delta_k} J_h q_{ljhek} \leq U_e, \quad \forall i \in \Psi; e \in \Omega; k \in \Theta_e \quad (8)$$

$$\sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek} \leq Q_{jh} - Q_{jh0}, \quad \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i; h \in \Delta_i \quad (9)$$

$$\sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek} \geq D_{jh} - Q_{jh0}, \quad \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i; h \in \Delta_i \quad (10)$$

$$-X \leq \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \left(\sum_{j \in \Psi, j > i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Phi, l < i} \sum_{j \in \Psi, j > i} q_{ljhek} \right) \hat{X}_{ek} \leq X, \quad \forall i \in \Phi \quad (11)$$

$$-X \leq \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \left(\sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Psi, l > i} \sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ljhek} \right) \hat{X}_{ek} \leq X, \quad \forall i \in \Psi \quad (12)$$

$$-Y \leq \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \left(\sum_{j \in \Psi, j > i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Phi, l < i} \sum_{j \in \Psi, j > i} q_{ljhek} \right) \hat{Y}_{ek} \leq Y, \quad \forall i \in \Phi \quad (13)$$

$$-Y \leq \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \left(\sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Psi, l > i} \sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ljhek} \right) \hat{Y}_{ek} \leq Y, \quad \forall i \in \Psi$$

$$\sum_{l \in \Psi, l > i} \sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ijhek} \Big) \hat{Y}_{ek} \leq Y, \forall i \in \Psi \quad (14)$$

$$WZ_0 + \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \hat{Z}_e \left(\sum_{j \in \Psi, j > i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Phi, l < i} \sum_{j \in \Psi, j > i} q_{lijhek} \right) \leq \left[W + \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \left(\sum_{j \in \Psi, j > i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Phi, l < i} \sum_{j \in \Psi, j > i} q_{lijhek} \right) \right] Z, \forall i \in \Phi \quad (15)$$

$$WZ_0 + \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \hat{Z}_e \left(\sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Psi, l > i} \sum_{j \in \Phi, j < i} q_{lijhek} \right) \leq \left[W + \sum_{h \in \Delta_i} \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} W_h \left(\sum_{j \in \Phi, j < i} q_{ijhek} + \sum_{l \in \Psi, l > i} \sum_{j \in \Phi, j < i} q_{lijhek} \right) \right] Z, \forall i \in \Psi \quad (16)$$

$$V_{\min} \leq v_{ij} \leq V_{\max}, \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i \quad (17)$$

$$q_{ijhek} \in \{0, Z^+\}, \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i; h \in \Delta_i; e \in \Omega; k \in \Theta_e \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i \quad (19)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \forall i \in \Phi \cup \Psi \quad (20)$$

其中, Φ 为去程供给港(回程需求港)集合, $N(N > 1)$ 为港口总数, Ψ 为回程供给港(去程需求港)集合, Δ_i 为供给港 i 车型集合, H_i 为供给港 i 车型总数, Ω 为滚装船甲板层集合, E 为滚装船甲板层总数, Θ_e 为滚装船甲板 e 车道集合, K_e 为第 e 层甲板车道总数, W 为滚装船空船质量, P 为单位燃油价格, R 为滚装船往返航次总航行时间, V 为滚装船设计航速, V_{\max} 为滚装船最大航速, V_{\min} 为滚装船最小航速, F 为滚装船在设计航速下的燃油消耗量, G_i 为港口 i 滚装船挂靠成本, T_h 为车型 h 的单位装(卸)时间(h/辆), C_h 为车型 h 的单位装卸成本(元/辆), L_{ij} 为港口 i 与 $j(i \neq j)$ 之间航线距离(海里), Q_{jh} 为需求港 j 车型 h 最大库存, U_e 为滚装船甲板 e 长度, J_h 为车型 h 长度, W_h 为车型 h 质量, X 为滚装船允许的最大横倾力矩, X_{ek} 为滚装船甲板 e 车道 k 距离船重心的近似横向水平距离, Y 为滚装船允许的最大纵倾力矩($\text{kg} \cdot \text{m}$), \hat{Y}_{ek} 为滚装船甲板 e 车道 k 距离船重心的近似纵向水平距离(m), Z 为滚装船允许的最高重心, \hat{Z}_e 为滚装船甲板 e 距离船底的近似垂直距离, Z_0 为滚装船空载时船底到船重心的垂直距离, Q_{jh0} 为需求港 j 车型 h 期初库存, D_{jh} 为需求港 j 车型 h 的需求量, v_{ij} 为滚装船从港口 i 至

港口 j 之间的航速, q_{ijhek} 为滚装船在港口 i 装载车型 h 放置甲板 e 车道 k 运至港口 j 的数量, x_{ij} 为 0-1 变量, 若滚装船由港口 i 航行至港口 j , 则 x_{ij} 取 1, 否则, 取 0, y_i 为 0-1 变量, 若滚装船挂靠港口 i , 则 y_i 取 1, 否则, 取 0;

在模型 M1 中, 目标函数式(1)表示船公司滚装船一个往返航次总成本最小化, 其中第一项为滚装船一个往返航次燃油消耗成本, 第二项为港口挂靠成本, 第三项为商品车装卸成本; 式(2)表示滚装船一个往返航次时间约束; 式(3)表示滚装船挂靠港口航线连接约束; 式(4)表示一个往返航次去程或回程每个港口至多挂靠一次; 式(5)和(6)分别表示滚装船去程和回程是否挂靠港口进行配送商品车约束; 式(7)和(8)分别表示去程和回程确保每层甲板每个车道配载车辆不超过该层甲板长度; 式(9)和(10)表示各港 VSC 各类商品车补货数量约束; 式(11)和(12)分别表示去程和回程船舶横倾扭矩约束; 式(13)和(14)分别表示去程和回程船舶纵倾扭矩约束; 式(15)和(16)分别表示去程和回程船舶重心约束; 式(17)表示船舶航速约束; 式(18)~(20)表示变量的属性约束。

模型 M1 综合考虑了商品车滚装船配载和路径协同优化问题, 其优点是便于实现船公司配送总成本最小化目标。然而, 由于其既含有连续变量, 如滚装船航速, 又含有整数变量, 如滚装船装载车辆数量, 还含有 0-1 变量, 如滚装船路径选择和挂靠港口选择, 故其求解计算复杂度较高。此外, 由于约束式(10)含有不确定需求参数 D_{jh} , 因而存在需求参数难以获取, 导致无法求解等不足。为此, 本文采用机会约束方法对其进行确定型转换, 即船公司事先给定某一置信水平(即客户服务水平) μ_{jh} , 使约束条件成立的概率不小于该置信水平, 即

$$P \left\{ \sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek} + Q_{jh} \geq D_{jh} \right\} \geq \mu_{jh}, \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i; h \in \Delta_i \quad (21)$$

于是, 可将模型 M1 转化为如下的确定型模型 M2:

目标函数同式(1);

约束条件同式(2)~(9)和式(11)~(20), 补充

$$\sum_{e \in \Omega} \sum_{k \in \Theta_e} q_{ijhek} + Q_{jh} \geq \bar{D}_{jh}, \forall i \in \Phi, j \in \Psi, j > i, \text{或 } i \in \Psi, j \in \Phi, j < i; h \in \Delta_i \quad (22)$$

$$\bar{D}_{jh} = \sup \{ G_{jh} \mid G_{jh} = f^{-1}(1 - \mu_{jh}) \}, \forall j \in \Psi \cup \Phi; h \in \Delta_i \quad (23)$$

其中, $f(\cdot)$ 为 D_{jh} 的分布函数, $f^{-1}(\cdot)$ 为其逆函数, \bar{D}_{jh} 为 D_{jh} 的确定性转换值, G_{jh} 为 $f^{-1}(\mu_{jh})$ 的函数值。

3 算法设计

不确定需求下商品车 RSRS 协同优化问题(模型 M2) 涉及多维(多装/卸港)、多类(多类商品车)和多背包(多层甲板与多车道)的组合优化, 是典型的背包变形 NP 难问题, 实际规模的算例无法用求解器在短时间内求得最优解。GA 虽然可应用于此类实际规模的问题求解, 但存在搜索时间长且收敛速度慢的缺陷。为此, 本文结合不确定需求下商品车 RSRS 问题特性, 将贪婪算法思想与 GA 融合, 设计 IGA。IGA 设计思路和流程如下:

1) 染色体编码。设染色体 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, $\lambda_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为车辆 i 被分配到所装甲板编号, $\lambda_i = 0, 1, 2, \dots, E$ 。确定初始种群规模、交叉概率、变异概率、染色体长度和最大迭代次数后, 输入车辆以及甲板信息(包括尺寸以及质量), 随后根据所输入信息生成染色体, $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, $\lambda_i = 0, 1, 2, \dots, E$ 。

2) 适应度函数选择。本文在满足滚装船航行安全的情况下, 以船公司航次总成本最小为目标函数, 对每个个体的适应度值进行排序, 适应度函数为目标函数的倒数, 适应值越高, 表示得到的解越好。

3) 选择、交叉与变异算子选择。选择算子选用轮盘赌方法和精英保存策略, 使种群中选个体可能性与其适应度值成正比, 并保留优良基因遗传给下一代种群。每个个体与种群的适应度值和之比即为个体进入下一代的概率, 个体适应度值越高, 在轮盘中所占面积越大, 被选中概率越大。若某个体为 x_0 , 其适应度为 f_{x_0} , 种群大小为 N , 进入下一代的概率

为 P_{x_0} , 则

$$P_{x_0} = \frac{f_{x_0}}{N}, x \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (24)$$

$$\sum_{x=1}^N f_x$$

结合滚装船多层甲板的特点, 交叉与变异算子分别采用两点交叉以及基本位顺序递增变异操作。

两点交叉方法为在两条父代染色体中随机选择起点和终点作为交叉点, 保证两个交叉点之间的基因片段不超过染色体长度; 再将两条父代染色体相对应交叉点间的基因片段互换, 其余片段保持不变。交叉操作表示不同层甲板间的车辆可互换, 在满足船舶稳定性的基础上, 充分利用甲板空间。基本位顺序递增变异操作表示可以将所有车辆向上移动一层, 到达上一层甲板, 改变后甲板会产生新的剩余平面, 经过多次变异会形成新的方案。

4) IGA 启发式配载规则。依据现实对每层甲板进行车道划分。商品车配载启发式规则: ①同一层甲板上同一类型车辆左右对称摆放防止车辆移位; 同一车道上兼顾不同种类车辆的排列顺序, 按照符合滚装船航行稳定性约束放置车辆, 防止船舶发生横倾、纵倾; ②计算每层甲板的剩余平面面积, 每配载一辆车, 剩余平面为配载前的平面面积减去配载车辆所占车道面积。当配载到每层甲板尾部时, 要根据稳定性约束选择适合剩余平面的商品车或商品车组合。

本文以遗传算法对车辆的预分配作为整体算法主程序, IGA 启发式配载规则对多层滚装船每层甲板进行优化, 并将结果嵌入到主程序中, 形成多层滚装船配载的混合算法, IGA 整体算法流程如图 1 所示。

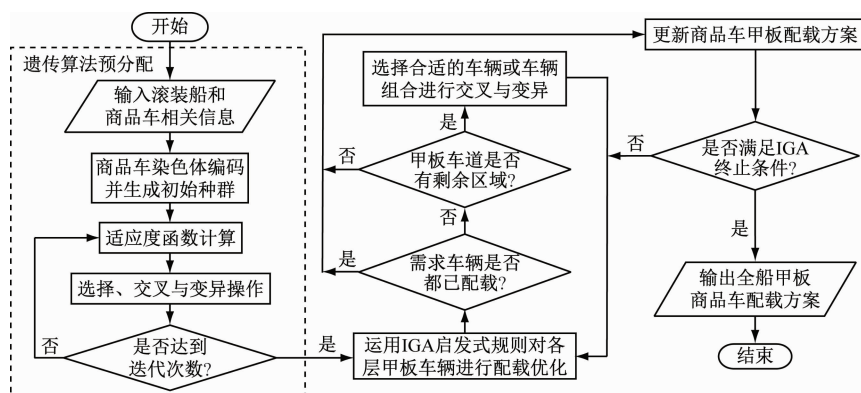


图1 IGA 流程

Fig. 1 The process of IGA

4 算例分析

设某船公司服务一条拥有六个挂靠港口的商品车滚装船航线,在6个往返航次的计划期内,船公司派船为需求港进行商品车配送。滚装船型号信息、航速信息、航行固定成本等相关数据均来自文献[9],燃油价格为2 000元/t,有关港口信息如表1所示。

表1 港口信息
Tab.1 The information of ports

| 序号 | 港口 | 挂靠费/元 | 停泊时长/h | 最大库存/辆 |
|----|-----|--------|--------|--------|
| 1 | 大连港 | 45 240 | 4 | 900 |
| 2 | 天津港 | 47 323 | 5 | 1 000 |
| 3 | 上海港 | 50 785 | 4 | 1 000 |
| 4 | 厦门港 | 42 369 | 3 | 800 |
| 5 | 广州港 | 39 224 | 6 | 1 000 |
| 6 | 海口港 | 44 510 | 3 | 800 |

由于需求数据属于商业机密,参照文献[11],将各航次计划期各港各车型实际需求由区间 $[1 * avg, 5 * avg]$ 随机生成,其中avg为上一计划期该港口商品车配送量除以计划期航行天数。商品车车辆信息来自实际调研数据(见表2)。

表2 商品车类型信息

Tab.2 Commodity vehicle type information

| 车辆类型 | 车长/ m | 车宽/ m | 车重/ t | 纵向安全 距离/m | 横向安全 距离/m |
|-------|----------|----------|----------|--------------|--------------|
| 金杯-海狮 | 5.1 | 1.7 | 3 | 0.4 | 0.3 |
| 一汽华利 | 3.4 | 1.5 | 2 | 0.6 | 0.5 |
| 通用君威 | 4.9 | 1.8 | 1.5 | 0.5 | 0.2 |
| 厦门-金龙 | 12 | 2.5 | 7 | 0.5 | 0.5 |
| 东风-天龙 | 9.6 | 2.3 | 6 | 0.4 | 0.2 |
| 海南马自达 | 4.3 | 1.7 | 1.8 | 0.3 | 0.3 |

本文采用C++语言对IGA进行编程,各项参数取值分别为:偏好值为0.3;最大迭代次数为300;交叉概率为0.9;变异概率为0.1。在Macbook(Retina, 12-inch, Early 2016),内存为8 GB 1867 MHz LPDDR3的笔记本电脑上,利用Visual Studio 2019软件,计算得到本文IGA(方法1)、文献[10]遗传算法(方法2)及lingo精确解(方法3)算例结果如表3所示。

由表3可见,与方法2比,方法1在解的质量和求解时间方面均有很大提升;与方法3相比,方法1

能在较短时间得到与精确解结果相同的值,可见本文设计的IGA能迅速得到商品车滚装船路径和配载满意方案。此外,在不同的航次,船舶挂靠港口并不完全一致,如在 $t=1$ 、 $t=2$ 、 $t=4$ 、 $t=7$ 、 $t=11$ 、 $t=14$ 、 $t=15$ 和 $t=19$ 的往返航次中,船舶分别在天津港、上海港、厦门港和广州港跳港(不挂靠),相比于固定挂靠港口策略,这种依据需求灵活挂靠港口的航行策略可以减少1.9%的总成本。即使挂靠港口相同,但由于需求的波动,船公司仍可结合需求及库存情况安排不同型号的滚装船配送。

在 $t=1$ 去程航次上,小型滚装船甲板配载情况如图2所示。

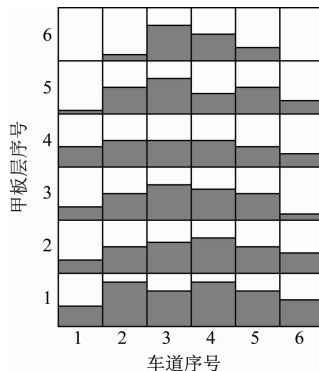


图2 甲板配载示意

Fig.2 The diagram of deck loading

图2中每一行代表每层甲板,每一列代表甲板上划分的车道数量,车道的填充度表示商品车占用的车道长度。从图2中可以看出,商品车在甲板上配载是均匀分散的,这样便会更好地保证滚装船在航行中的稳定性,符合应对风浪或特殊天气的实际环境需要。

在滚装船配送中,安全库存是影响船舶挂靠港口决策的一项重要指标。为此,本文以下通过设置为M(适度,即最大库存的三分之一)、T(紧缩,即最大库存的六分之一)和L(宽松,即最大库存的二分之一)三种安全库存,分析20个航次计划期内滚装船总成本和各项平均成本变化情况,计算结果如图3所示。

由图3a可以看出,当安全库存设置为T时,总成本浮动较大,虽然在 $t=1$ 至 $t=4$ 时总成本支出骤减,但在 $t=5$ 至 $t=16$ 时的缺货成本大大增加,因而船公司不仅要支付增派大型滚装船的航次费用,还要为不满足需求的惩罚成本买单;当设置为L时,总成本支出最多,因为安全库存设置过高导致需求港在各时期均需要挂靠配送,库存积压成本过高。由图3b的各项平均成本构成情况可以看出,虽然在

表3 三种方法计算结果
Tab.3 The calculation results of three methods

| 航次 | 挂靠港口序号 | 船型 | 方法1 | | 方法2 | | 方法3 | |
|--------|-----------------------|----|-----------|------|-----------|-------|-----------|--------|
| | | | 总成本/元 | 时间/s | 总成本/元 | 时间/s | 总成本/元 | 时间/s |
| $t=1$ | 1-2-3-4-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 2 334 130 | 327 | 2 591 047 | 1 084 | 2 334 130 | 15 120 |
| $t=2$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-1 | 中型 | 2 466 970 | 359 | 2 654 244 | 921 | 2 466 970 | 12 040 |
| $t=3$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 大型 | 3 073 989 | 304 | 3 095 052 | 1 007 | 3 073 989 | 14 970 |
| $t=4$ | 1-2-3-5-6-5-4-3-2-1 | 中型 | 2 669 280 | 451 | 2 677 963 | 2 604 | 2 669 280 | 18 720 |
| $t=5$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 大型 | 3 134 194 | 422 | 3 140 749 | 1 266 | 3 134 194 | 13 680 |
| $t=6$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 2 410 058 | 380 | 2 677 102 | 1 191 | 2 410 058 | 14 040 |
| $t=7$ | 1-2-4-5-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 2 676 433 | 425 | 2 538 485 | 1 083 | 2 676 433 | 16 698 |
| $t=8$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 中型 | 3 110 058 | 321 | 3 226 482 | 1 002 | 3 110 058 | 14 011 |
| $t=9$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 大型 | 3 167 262 | 394 | 3 367 325 | 1 102 | 3 167 262 | 15 263 |
| $t=10$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 中型 | 3 172 421 | 426 | 3 382 472 | 905 | 3 172 421 | 16 431 |
| $t=11$ | 1-2-3-4-5-6-5-3-2-1 | 大型 | 2 835 242 | 452 | 2 836 872 | 1 081 | 2 835 242 | 15 644 |
| $t=12$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 2 638 645 | 332 | 2 782 753 | 1 030 | 2 638 645 | 13 801 |
| $t=13$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 3 276 728 | 451 | 3 378 286 | 1 085 | 3 276 728 | 14 357 |
| $t=14$ | 1-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 中型 | 2 865 451 | 439 | 2 873 946 | 1 052 | 2 865 451 | 17 191 |
| $t=15$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-2-1 | 大型 | 2 907 453 | 366 | 2 964 545 | 1 018 | 2 907 453 | 11 675 |
| $t=16$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 中型 | 3 179 965 | 325 | 3 377 672 | 1 017 | 3 179 965 | 17 483 |
| $t=17$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 大型 | 3 123 243 | 383 | 3 267 223 | 940 | 3 123 243 | 13 505 |
| $t=18$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 3 027 676 | 377 | 3 182 763 | 1 288 | 3 027 676 | 19 613 |
| $t=19$ | 1-2-3-4-6-5-4-3-2-1 | 小型 | 2 699 764 | 307 | 2 773 513 | 1 106 | 2 699 764 | 12 783 |
| $t=20$ | 1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1 | 中型 | 3 004 872 | 348 | 3 376 764 | 966 | 3 004 872 | 10 941 |

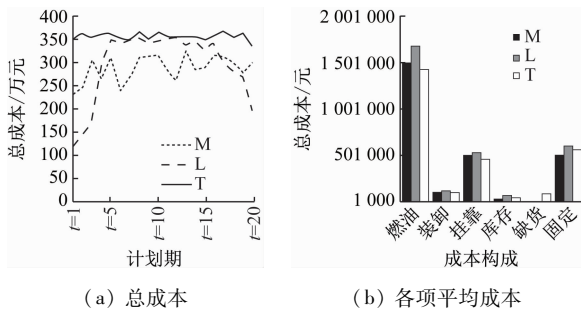


图3 不同安全库存下的总成本和各项平均成本

Fig.3 The total cost and average cost of each item under different levels of safety inventory

$t=1$ 至 $t=4$ 与 $t=17$ 至 $t=20$ 八个航次计划期,总成本比 M 的略有减少,但从整体 20 个航次计划期来看,平均成本仍高于 M 的 1.6%。但从整体 6 个航次计划期来看,平均成本仍高于 M 的 1.6%。此外,在成本构成中,船舶燃油成本约占总成本 53%,表明燃油消耗仍是滚装船航行中的主要成本支出,且在不同的需求情况下,配置不同类型船舶,燃油消耗也会发生很大改变,大型与小型滚装船在同一条航线上,往返航次燃油消耗约有 4% 的差异,由此表

明,在每个往返航次,船公司均应根据需求和库存选用合适的滚装船船型。

5 结束语

本文在考虑商品车需求不确定的情况下,按照需求港定期库存补货政策,结合各决策期期初库存水平,提出了商品车滚装船在多个航次计划期内灵活挂靠港口的航行策略,构建了 RSRs 混合整数规划模型,并设计了 IGA 求解算法,算例结果验证了模型和算法的有效性,研究结果表明:与固定挂靠港口策略相比,灵活挂靠港口的航行策略可以减少 1.9% 的滚装船配送总成本,船公司安排不同型号的滚装船配送亦可有效降低总成本。设置适度的安全库存,有助于船公司降低计划期的总成本。此外,燃油消耗是滚装船航行中的主要成本支出,在同一条航线上,大型与小型滚装船往返航次燃油消耗约有 4% 的差异。

本文研究的管理启示如下:1) 船公司可以转变传统商品车滚装船配送的定期定点定量策略,应采取灵活挂靠港口的航行策略,优化决策挂靠港口、配

送数量的具体车型、以及这些车辆在甲板上的合理积载位置。2)船公司应组建异构多类型滚装船队,根据计划期各航次的需求和港口 VSC 库存,选派合适类型的滚装船进行配送,以便在有效降低燃油成本的同时,降低总成本。3)船公司应设置适度的安全库存,以实现计划期的总成本优化目标。

依托本文今后可进行如下拓展研究,本文研究是在供给港库存充足的假定下开展的,尚未考虑供给港车辆配送中心库存容量限制因素,未来可以进一步同时开展考虑需求港和供给港库存因素的商品车 RSRs 协同优化研究。

参 考 文 献

- [1] 武卓威,刘俊,王浩,等. 车辆甲板次要构件多轮印载荷等效与简化方法[J/OL]. 中国舰船研究. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03499>. WU Z W, LIU J, WANG H, et al. The equivalence and simplification of multi-wheel loading on secondary member of vehicle deck [J/OL]. Chinese Journal of Ship Research. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03499>. (in Chinese)
- [2] CHANDRA S, CHRISTIANSEN M, FAGERHOLT K. Analysing the modal shift from road-based to coastal shipping-based distribution-a case study of outbound automotive logistics in India [J]. Maritime Policy & Management. 2020, 47(2): 273-286.
- [3] 张煜,马少康,马杰,等. 带二维装箱约束的客货滚装船配载决策[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 202-210. ZHANG Y, MA S K, MA J, et al. Passenger-cargo RoRo ships stowage planning decision with two-dimensional packing constraints [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(4): 202-210. (in Chinese)
- [4] 刘迪. 滚装船的波浪稳定性数学建模和稳定性分析[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(4): 16-19. (in Chinese) LIU D. Mathematical modeling and stability analysis of wave stability of roll-on-roll-off ship [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(4): 16-19.
- [5] JESUS M, FERNANDO V. Spanish initiative for fully automated stowage on roll-on/roll-off operations [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14(5): 173-182.
- [6] 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 RoRo ship stowage planning [J]. Navigation of China, 2010, 33(2): 84-88. (in Chinese)
- [7] 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 Z H, YANG D, QIU B, et al. Effective model and algorithm for multilayer RoRo ship loading [J]. Journal of System Engineering, 2013, 28(2): 218-226. (in Chinese)
- [8] 孙霄峰,沈晔,许昕鹭,等. 汽车专运船单层甲板装载配载优化[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(6): 638-647. SUN X F, SHEN Y, XU X A, et al. PCFC stowage optimization with single deck [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(6): 638-647. (in Chinese)
- [9] OVSTEBØ B O, LARS M, KJETIL F. Optimization of stowage plans for RoRo ships [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(10): 1425-1434.
- [10] 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 RoRo ship loading for multiple ports based on realistic constraints [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(1): 117-123. (in Chinese)
- [11] 孙霄峰,王森浩,刘春雷. 滚装船车辆自动配载研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(9): 94-100. SUN X F, WANG S H, LIU C L. Research on automatic stowage of Ro-Ro ships [J]. Ship Engineering, 2021, 43(9): 94-100. (in Chinese)
- [12] BO D, MARIELLE C, KJETIL F, et al. Combined maritime fleet deployment and inventory management with port visit flexibility in roll-on roll-off shipping [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 140(11): 101988.
- [13] HENRIK A, FAGERHOLT K, HOBESLAND K. Integrated maritime fleet deployment and speed optimization: case study from RoRo shipping [J]. Computers & Operations Research, 2015, 55(3): 233-240.
- [14] OVSTEBØ B O, LARS M, KJETIL F. Routing and scheduling of RoRo ships with stowage constraints [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(6): 1225-1242.
- [15] 李彤,崔晶. 不确定需求环境下的路径-装载协同优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2561-2580. LI T, CUI J. Research on routing-loading cooperative optimization under uncertain demand environment [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(10): 2561-2580. (in Chinese)