

# 新燃料散货船航线的燃料加注和航速协同优化

黄珍平<sup>1</sup>, 赵科<sup>2</sup>, 季盛<sup>1</sup>

(1. 上海船舶运输科学研究所有限公司 水路交通控制全国重点实验室, 上海 200135;  
2. 中国远洋海运集团有限公司, 上海 200135)

**摘要:**为响应日趋严苛的航运排放法规,采用液化天然气(LNG)和甲醇等新能源的船舶正逐步投入使用。但是能够提供新燃料加注服务的港口数量远少于传统燃油补给点,这使得新燃料船的航线运营规划更加困难。航运公司急需在加注站点稀缺的环境中,合理规划航线、助力新燃料散货船营运。为此本研究以总排放量最小化为目标,在考虑航程总时间和船舶速度可调范围等约束条件的基础上,构建了一种混合整数非线性规划数学模型。针对模型非线性特性,提出了一种变邻域框架的启发式求解算法,以高效获取近似最优解。最后,通过单航次及连续航次两种典型航线场景的案例研究,深入解析了燃料补给策略与航速的协同优化决策,验证了所提模型与算法的有效性。

**关键词:**新燃料船;协同优化;燃料加注策略;航速优化

中图分类号:U692.3 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.015

## Collaborative optimization of fuel bunkering and voyage speed for routes of alternative fuel bulk carrier

HUANG Zhenping<sup>1</sup>, ZHAO Ke<sup>2</sup>, JI Sheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 2. COSCO Shipping Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

**Abstract:** In response to increasingly stringent maritime emission regulations, vessels using alternative fuels—such as Liquefied Natural Gas (LNG) and methanol—are being gradually deployed. However, the number of ports offering bunkering for these new fuels remains significantly lower than those supplying conventional fuels, making route planning and operational management more challenging for alternatively fueled vessels. Shipping companies urgently need to rationally design routes and support the operation of alternative fuel bulk carriers within the context of scarce refueling infrastructure. To this end, this study develops a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model aiming to minimize total emissions, incorporating constraints such as total voyage duration and adjustable speed ranges. To address the nonlinear nature of the model, a heuristic algorithm based on variable neighborhood search is proposed to efficiently obtain near-optimal solutions. Finally, through case studies under both single-voyage and continuous-voyage scenarios, the collaborative optimization of refueling strategies and speed adjustments is thoroughly analyzed, demonstrating the effectiveness of the proposed model and algorithm.

**Key words:** alternative fuel vessel; collaborative optimization; fuel bunkering strategy; speed optimization

作为全球贸易的核心运输方式,航运业产生了约3%的全球温室气体排放<sup>[1]</sup>,2021年全球航运相关温室气体排放达8.33亿吨<sup>[2]</sup>。为应对这一环境

问题,国际海事组织出台多个强制性排放控制法规要求船舶减排,推动行业向LNG、甲醇等新燃料船舶转型,并配套安装脱硫装置、节能装置等进行技

收稿日期:2024-07-11

作者简介:黄珍平(1989—),男,副研究员,研究方向为船舶能效和智能船舶。E-mail: hzp0603@126.com

引用格式:黄珍平,赵科,季盛. 新燃料散货船航线的燃料加注和航速协同优化[J]. 中国航海,2025,48(3):121-128.

HUANG Z P, ZHAO K, JI S. Collaborative optimization of fuel bunkering and voyage speed for routes of alternative fuel bulk carrier[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 121-128. (in Chinese)

术改造。

然而,新燃料的应用引发了一系列运营决策难题。以LNG动力船舶为例,其航线规划需直面燃料加注基础设施不足的制约。当前全球LNG燃料补给港口的布局存在明显的区域失衡问题,其中中国仅盐田、宁波及上海三个港口拥有LNG燃料供应能力,导致船舶被迫调整航线以匹配加注节点,显著增加运营复杂度。此外,排放强度与航速呈非线性正相关,迫使航运企业在航线设计中同步权衡航速优化与燃料成本,形成多目标决策困境。

现有研究多聚焦传统燃油船舶的排放模型,对LNG等新型燃料船舶的加注网络与动态航速协同优化问题缺乏系统性探讨。例如,WANG等<sup>[3]</sup>研究了多航线的集装箱班轮运输航速优化、加油策略优化和船舶调配问题,利用分段线性逼近的方式处理非线性项,从而建立了一个混合整数线性规划模型,其数值试验结果表明随着燃油价格的增加,部署的船舶数量和总航行时间大幅增加,而加油量和平均航行速度则显著下降;WANG等<sup>[4]</sup>以集装箱班轮运输收益最大为目标,研究了班轮航线的航速优化、加油港口以及加油量优化的非线性整数规划问题;林贵华等<sup>[5]</sup>聚焦于硫排放控制区、碳税及港口时间窗约束下的班轮运营问题,构建了航速优化与燃料补给策略的非线性混合整数规划模型,并借助Lingo求解器进行求解;刘翠莲等<sup>[6]</sup>探讨了易腐品集装箱班轮运输,以最小化碳税与货损等综合成本为目标,以航速和燃料补给为决策变量建立混合整数规划模型,其数值分析表明,提高碳税率会导致船舶加油量、碳排放及平均航速降低;杨华龙等<sup>[7]</sup>同样针对易腐品集装箱运输,研究了船期设计与加油策略的协同优化,实证发现易腐品腐败损失及班轮总运营成本均与燃油价格呈正相关;李德昌等<sup>[8]</sup>则考察了船舶到港具有多时间窗、多起讫时刻及多装卸速率合作协议的复杂场景,建立了集装箱班轮船期设计与加油策略的联合优化模型,数值试验揭示延长船舶到港时间窗有助于降低系统总成本。DE等<sup>[9]</sup>研究了考虑时间窗口的燃料加注优化问题,提出了一种混合粒子群优化和基本变量邻域搜索算法来进行问题求解,结果表明该算法在航线加油港选择和燃油加注量优化方面效果较好;DAS等<sup>[10]</sup>研究了船舶航线上每个航段的航速和加油量联合优化问题,其建立的多目标优化模型可以考虑燃油价格波动,并将排放成本纳入模型中;OMHOLT-JENSEN等<sup>[11]</sup>研究了考虑燃料加注优化的租船航线调度问题,运用弧流模型和一种基于路径流模型的求解方法,对

航线最佳燃料量和货物量进行优化,从而为货运合同和燃油价格谈判提供支持。

针对新型燃料船舶的航速优化与燃料补给策略问题,本研究选取某散货船航程作为实例,构建了以燃料总消耗量最小化为目标函数、同时考虑总航程时间及燃料消耗与补给等约束的混合整数非线性规划(MINLP)模型。为求解该模型,开发了一种变邻域搜索(Variable Neighborhood Search, VNS)算法,并依托航运公司实际案例开展算例分析,验证了模型与算法的有效性及其实用性,旨在为船舶运营管理者提供航速与燃料补给决策支持。

## 1 问题描述

### 1.1 绕航加注

当前,多数散货码头普遍缺乏新型燃料补给能力,因此采用新型燃料的散货船在挂靠此类码头时,往往需绕航至其他燃料港进行补给。以图1所示航次为例,船舶可选择在去程航段(起始港至装货港)、返程航段或在去程及返程航段均进行燃料补给。本研究在考虑船舶挂靠燃料补给港的经济性约束(包括引航服务费、泊位使用时长等相关附加成本)的前提下,对航线规划做出以下限定:任一航次(往返航程)仅允许选择不超过一个燃料补给港。为优化决策流程,研究采用预先指定策略,即为每个航段确定唯一指定的燃料补给站点,若某航段存在多个候选补给港,则分别评估各备选港的燃料消耗与航程指标,最终选取燃料消耗最低或航程最短的港口作为该航段最优补给点。

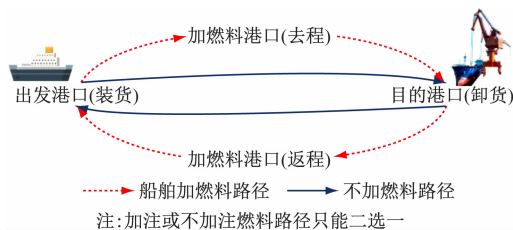


图1 船舶绕航加注

Fig. 1 Vessels deviation bunkering

### 1.2 燃料加注与航速协同优化

某新燃料船舶需在严格的时间窗约束下完成单航次或多航次序列的运输作业规划,力求全程总排放量最小化。模型设定所有航次均从固定装货港出发,满载货物后航行至指定卸货港完成卸载,随后空载返回起始港。假设该船型的运营航线满足长航线特征,即在航线运营过程中必须考虑燃料补给,考虑到船舶的航行速度与燃料补给方案选择会显著影响其排放表现和运营成本,需对各航段的最佳航速及

燃料补给方案进行合理规划。

## 2 模型构建

### 2.1 前提假设

模型构建基于如下假设:1)船舶在每个航线段的航行时间可以用航段距离和平均航速来估算;2)船舶在港口任意挂靠时间窗内到港均不存在等待时间,即不存在靠泊等待、卸船等待、加注等待时间;3)港口的装卸速度已知。

### 2.2 符号说明

1) 集合

$V$ :需要挂靠的卸货港口集合;

$V_{ij}$ :任意两个港口间的航线集合。

2) 参数

$O$ :装货港的位置信息;

$O'$ :增设的一个与原装货港对应的镜像虚拟港口,以便描述最终返回装货港的情形;

$Q$ :船舶的燃料舱容量;

$v_{\min}, v_{\max}, v_d$ :船舶的最小、最大、设计航速;

$\pi_{ij,p}$ :港口  $i$  与港口  $j$  间航线  $p$  的燃料补给速率;

$r_0$ :船舶执行首个航次时自装货港出发的剩余燃料量;

$d_i$ :在港口  $i$  的卸货时间;

$d_{ij,p}$ :港口  $i$  和港口  $j$  之间航线  $p$  的总距离;

$d_{ay}$ :整个航次的总航行天数;

$f_d$ :船舶以设计航速航行时每日燃料消耗量;

$M$ :一个足够大的数。

3) 决策变量

$x_{ij,p} \in \{0,1\}$ :船舶是否选用港口  $i$  与港口  $j$  间的航线  $p$ ;

$v_{ij,p} \geq 0$ :船舶在航线  $p$  的航速;

$c_{ij,p} \in \mathbf{Z}^+$ :船舶在航线  $p$  的燃料消耗量;

$\theta_{ij,p} \in \{0,1\}$ :船舶是否在港口  $i$  至港口  $j$  间航线  $p$  进行燃料补给;

$b_{ij,p} \in \mathbf{Z}^+$ :在港口  $i$  和港口  $j$  之间的航线  $p$  上加注的燃料量;

$\delta \in \mathbf{Z}^+$ :总燃料消耗量;

$r_i, r_j \in \mathbf{Z}^+$ :到达港口  $i, j$  时的燃料剩余量。

### 2.3 数学模型

本研究以总燃料消耗最小化为优化目标,其根本原因在于燃料消耗是船舶排放的主要来源,二者呈强正相关。在模型中,航段燃料消耗的核心影响因素是航速,二者关系通常遵循非线性关系,且燃料消耗会受到载重情况、动力装置性能等多因素影响,为了便于处理,选择的航段燃料消耗函数<sup>[7,12]</sup>为:

$$f(v_{ij,p}) = \frac{f_d d_{ij,p}}{24v_d^3} v_{ij,p}^2 \quad (1)$$

因此,目标函数可以表示为:

$$\min \sum_i \sum_j \sum_p c_{ij,p} = \sum_i \sum_j \sum_p f(v_{ij,p}) x_{ij,p} \quad (2)$$

约束条件为:

$$\sum_{j \in V} \sum_{p \in V_{ij}} x_{ij,p} = 1, \forall i \in V \cup (O) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V \cup (O)} \sum_{p \in V_{ij}} x_{ij,p} = \sum_{j \in V \cup (O')} \sum_{p \in V_{ij}} x_{ij,p}, \forall j \in V \cup (O') \quad (4)$$

$$b_{ij,p} \geq \theta_{ij,p} (Q - r_i), \forall i \in V \cup (O), \forall j \in V \cup (O'), \forall p \in V_{ij} \quad (5)$$

$$r_j = r_i - \sum_{p \in V_{ij}} f(v_{ij,p}) x_{ij,p} + \sum_{p \in V_{ij}} b_{ij,p}, \forall i \in V \cup (O), \forall j \in V \cup (O') \quad (6)$$

$$d_{ay} \geq \sum_{i \in V \cup (O)} \sum_{j \in V \cup (O')} \sum_{p \in V_{ij}} x_{ij,p} \left( \frac{d_{ij,p}}{v_{ij,p}} + h_i + \frac{b_{ij,p}}{\pi_{ij,p}} \right) \quad (7)$$

$$v_{\min} \leq v_{ij,p} \leq v_{\max}, \forall i \in V \cup (O), \forall j \in V \cup (O'), \forall p \in V_{ij} \quad (8)$$

式(3)限定了船舶必须自始发港口出发,并依次停靠所有的卸货港口;式(4)表示流平衡约束,其保证了每个港口有且仅有一个前序港口和一个后序港口;式(5)描述了港口  $i$  与港口  $j$  间航线  $p$  上的燃料加注量;式(6)给出了船舶抵达港口  $j$  时的剩余燃料量;式(7)表示该航线的总时长;式(8)定义了港口  $i$  与港口  $j$  间航线  $p$  的航行速度。本文模型中船舶航速和航线的相关约束与 NORSTAD 等<sup>[13]</sup>建模方式类似。

## 3 算法设计

该模型因包含速度决策而呈现非线性特征,这使得传统精确算法无法求解该问题。相比之下,启发式算法对问题的非线性特性具有良好的适应性,因此,本研究采用启发式方法求解该模型。启发式方法的通用求解框架通常包含以下步骤:基于问题特征或预设规则构造初始可行解;随后,定义并实施一系列邻域搜索操作以探索解空间;通过反复迭代并结合一定的扰动机制规避局部最优陷阱,最终逼近或获得全局最优解。本文将选用 VNS 算法这种启发式算法求解,其基本求解框架包括初始编码、解码和邻域搜索三个核心步骤。

### 3.1 初始解编码

该问题核心在于决策任意两港口间航段的航速及燃料加注时机。值得注意的是,当每个航段的航速确定之后,如装货港到卸货港 1 的航速是 10 kn,

卸货港1返回装货港的航速是10.5 kn,可以根据去程或返程的燃料消耗情况来判断是否需要去程或返程加注。为此,采用图2所示的双层编码结构:上层表征各航次去程航速,下层表征返程航速,以此定义问题的解。然后可以对双层编码的信息进行解码,从而获取燃料加注决策。根据已知的航速和燃料补给数据,能够推算出每个航段的航行时长及燃料用量,最终得出总航行时长和总燃料消耗量。

	卸货港1	卸货港2	卸货港3
去程航速/kn	10.0	11.2	11.3
返程航速/kn	10.5	9.5	10.5

图2 解的双层编码形式

Fig. 2 The two-layer coding form of the solution

### 3.2 解码

假设已知船舶从起始港出发时的燃料量,并且往返均不需要加注,其航线如图3所示。



图3 装卸货港口之间的直航航段

Fig. 3 Direct voyage between loading and unloading ports

基于给定的航速、航段距离以及燃料消耗信息估算去程航段以及从装货港到返程加注港的燃料消耗量。若船舶在到达去程装货港或返程燃料加注港时,剩余燃料储备低于安全标准,则需在前往装货港的途中就停靠燃料加注港口进行补给。反之,若上述两处港口的剩余燃料量均高于安全值,则去程无需加注。

同理,基于船舶到达卸货港时的剩余燃料量,并按照图3中所示的返程航段来判断船舶是否需要去程加注。若返回卸货港或下一个去程中到达燃料加注港时,剩余燃料储备低于安全标准,则需在返回卸货港的途中就停靠燃料加注港口进行补给;否则,无需挂靠,按图3航线航行即可。

与之类似,按照同样的方法分析船舶的连续航次的航速、燃料消耗、燃料加注和航行时间情况,并统计总航次的燃料消耗和航行时间信息,如果总航次的航行时间大于规定的航次总时间,那么需要重新生成初始解直到满足航次总时间的要求。

### 3.3 变邻域搜索

变邻域搜索算法主要包含两个核心构成部分:扰动操作和变邻域下降(Variable Neighborhood Descent, VND)算法。扰动操作指依据预设的扰动规则(或称邻域结构),其功能是将当前解映射到邻域空间中的一个新解。本研究专门设计了两类算子

来产生邻域解:

1) 航速交换算子(Swap Operator):该算子通过交换两个不同航次(例如,访问卸货港1和卸货港2的航次)的决策来生成新解,具体分为两种模式。

第一种模式是部分交换模式,即仅两个航次的部分决策,如图4所示,仅对去程航速 $v_1$ 进行了交换,这种小范围的变动适用于VND中的精细搜索。

卸货港口	1	2	3
去程航速 $v_1$ /kn	10.0	11.2	11.3
返程航速 $v_2$ /kn	10.5	9.5	10.5

↓ 交换卸货港1和卸货港2的去程航速 $v_1$

卸货港口	1	2	3
去程航速 $v_1$ /kn	11.2	10.0	11.3
返程航速 $v_2$ /kn	10.5	9.5	10.5

图4 航速交换算子示例1

Fig. 4 Example 1 of speed commutative operators

第二种模式是完全交换模式,同时交换两个航次的去程航速和返程航速以及他们的执行顺序(即在编码中的列位置,如图5所示)。该操作方法会显著改变现有解的构成形式,特别适合作为VNS算法中的扰动环节,能够有效扩大解空间的探索范围并突破局部极值的限制。

卸货港口	1	2	3
去程航速 $v_1$ /kn	10.0	11.2	11.3
返程航速 $v_2$ /kn	10.5	9.5	10.5

↓ 交换卸货港1和卸货港2所在的两列

卸货港口	1	2	3
去程航速 $v_1$ /kn	11.2	10.0	11.3
返程航速 $v_2$ /kn	9.5	10.5	10.5

图5 航速交换算子示例2

Fig. 5 Example 2 of speed commutative operators

2) 航速调整算子(Adjustment Operator):该算子随机选择一个航次,并对其一个或多个决策(如去程航速和/或返程航速)在预设的有效范围内进行随机修改(如图6所示)。此算子通过引入新值来增加解的多样性。

卸货港口	1	2	3
去程航速 $v_1$ /kn	10.0	11.2	11.3
返程航速 $v_2$ /kn	10.5	9.5	10.5

↓ 变化卸货港3的去程航速( $v_1$ )和返程航速( $v_2$ )

卸货港口	1	2	3
去程航速 $v_1$ /kn	10.0	11.2	11.8
返程航速 $v_2$ /kn	10.5	9.5	10.1

图6 航速变化算子示例

Fig. 6 Example of speed variational operators

在利用调整或交换算子获取到新的邻域解后,通过初始解生成部分提到的解码方式进行解码,从而得到去程和返程的燃料加注决策。需要注意的是,新生成的解必须是可行解,即满足总航行时间等约束。若生成了不可行解,则废弃该解并重新执行邻域操作,直至获得可行解。

VND 是 VNS 框架中的局部优化引擎,其目的是在当前解的邻域空间系统性地寻找更优解。VND 定义了一系列预设的邻域空间  $N_1, N_2, \dots, N_{\max}$ 。根据预设的寻优机制,当算法在初始邻域  $N_1$  中无法进一步优化解(即达到局部收敛状态)时,将切换至邻域  $N_2$  进行搜索。若在  $N_2$  的搜索过程中获得更优解,则算法将返回初始邻域  $N_1$  重新执行搜索过程。反之,若未获得改进解,则按顺序转入邻域  $N_3$  继续搜索。该迭代过程将持续进行,直至满足以下任一终止条件:1)完成最大邻域  $N_{\max}$  的遍历仍未发现改进解;2)达到预先设定的收敛阈值。其伪代码逻辑如表 1 所示。

表 1 VND 算法伪代码

Tab. 1 Pseudocode of VND algorithm

Algorithm 变邻域下降(VND)
01: function VND
02: 给定初始解 $s_0$
03: $s^* = s_0$
04: 定义 $k_{\max}$ 个邻域 $N_k, k = 1, \dots, k_{\max}$
05: $k = 1$
06: while( $k \leq k_{\max}$ ) do
07: 在邻域结构 $N_k$ 上执行搜索以获取解 $s'$
08: if 找到的解比当前解更好 then
09: $s^* = s'$
10: $k = 1$
11: else
12: $k = k + 1$
13: end while
14: return $s^*$
15: end function

图 7 直观地描绘了 VND 算法的执行流程。搜索从第一个邻域开始,如果当前邻域无法产生更优的解,则按顺序探索下一个邻域(如图中虚线路径)。这个过程会持续进行,直到在某个邻域中成功发现一个优于当前解的新解。此时,算法会立即采纳这个新解,并返回到起始邻域,重新启动整个搜索循环(如图中实线箭头路径所示),以期在新解的基础上进一步改进。

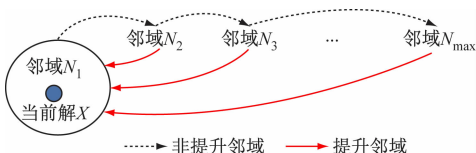


图 7 VND 算法

Fig. 7 VND algorithm

变邻域搜索算法的整体流程伪代码见表 2。算法初始化时初始化当前最优解,在每次迭代中,随机选择一种扰动机制(交换算子或调整算子)作用于当前解,生成一个邻域;随后,在该邻域内应用变邻域下降(VND)算法进行局部寻优。

表 2 VNS 算法伪代码

Tab. 2 Pseudocode of VNS algorithm

Algorithm 变邻域搜索(VNS)
01: function VNS
02: 给定初始解 $s_0$
03: $s^* = s_0$
04: 随机选择交换算子或调整算子作为扰动机制
05: $k = 1$
06: while( $k \leq k_{\max}$ ) do
07: 随机选取扰动方式找到一个邻域
08: 采用 VND 算法更新邻域解
09: 记录 $s^{*'}$
10: $k = k + 1$
11: end while
12: return $s^{*'}$
13: end function

## 4 数值试验

本节通过对一个典型的单航次及连续航次场景进行仿真分析,以验证所提模型与算法的有效性。案例参数设置如下:

- 1) 船舶参数:燃料舱最大容量为 3 000 t,初始载燃料量为 2 000 t,安全备用燃料量为 200 t;
- 2) 航速约束:船舶的运营航速为 9 ~ 15 kn;
- 3) 燃料消耗模型:为简化计算,两港间的燃料消耗量(单位:t)由公式  $0.016/24 \times d_{ij,p} \times (v_{ij,p})^2$  表示,燃料类型为 LNG,其碳排放因子取 2.75;
- 4) 算法参数:VNS 算法的外循环最大迭代次数设置为 500 次。

### 4.1 单航次优化分析

以防城港(Fangcheng Gang)至几内亚博法港(Port of Boffa, Guinea)航线为算例,选定伊丽莎白港(Port Elizabeth)为燃料补给点。应用优化模型求解该航次下的最佳航速分布与补给计划,并量化其燃料消耗及碳排放。总航行时间约束设定为 89 天,各航段距离详见表 3。

基于前述参数配置,运用 VNS 算法求解获得优化方案,如表 4 所示。

表3 单航次各港间距离

Tab.3 Distance between ports of the voyage

航段	距离/n mile
防城港—博法港	10 063
防城港—伊丽莎白港	6 443
防城港—伊丽莎白港—博法港	10 088
博法港—防城港	10 147
博法港—伊丽莎白港	3 667
博法港—伊丽莎白港—防城港	10 174

表4 单航次(89天)航速与加注优化结果

Tab.4 The optimization results of voyage speed and refueling for a single voyage (89 days)

参数	数值
燃料消耗量/t	1 216.2
排放量/t	3 344.6
航次时间/h	2 127.5
去程航速/kn	9.4
返程航速/kn	9.6
加注策略	无需加注
加注量/t	0

为了进一步探究航行时间约束对优化策略的影响,将航次最大航行时间压缩19天,优化后航速和加注策略将发生变化,如表5所示。

表5 单航次(70天)航速与加注优化结果

Tab.5 The optimization results of voyage speed and refueling for a single voyage (70 days)

参数	数值
燃料消耗量/t	1 960.3
排放量/t	5 390.8
航次时间/h	1 679.9
去程航速/kn	11.8
返程航速/kn	12.3
加注策略	返程加注
加注量/t	1 304

不同时间约束下的优化结果(表4、5)表明,航次总可用时间越短,船舶需维持越高的往返平均航速,导致燃料消耗与碳排放量相应增加。

#### 4.2 连续航次优化分析

为评估模型与算法在更复杂的长周期、连续航次场景下的求解性能,构建了包含三个连续航次的

运输任务场景。在该场景中,船舶需在120天的总时限内依次完成以下三个航次。

- 1) 博法港(装)→防城港(卸);
- 2) 黑德兰港(Hedland)(装)→防城港(卸);
- 3) 肯布拉港(Port Kembla)(装)→防城港(卸)。

燃料补给策略设定为:航次1往返选择伊丽莎白港补给;航次2、3则选定新加坡港(Singapore)进行补给。依据给定信息,优化得到的最优航速及补给决策见表6。

表6 连续航次(120天)航速与加注优化结果

Tab.6 The optimization results of voyage speed and refueling for continuous voyages (120 days)

参数	航次		
	航次1	航次2	航次3
燃料消耗量/t	2 000.56	690.6	1 268.92
排放量/t	5 501.5	1 899.2	3 489.5
航次时间/h	1 671.4	447.61	760.32
去程航速/kn	11.4	14	12.8
返程航速/kn	12.9	12.4	14.5
加注策略	返程加注	去程加注	去程加注
加注量/t	2 278.68	1 080.96	2 755.26

若延长总航次时间至140天,可得到新的优化结果,如表7所示。

表7 连续航次(140天)航速与加注优化结果

Tab.7 The optimization results of voyage speed and refueling for continuous voyages (140 days)

参数	航次		
	航次1	航次2	航次3
燃料消耗量/t	1 602.88	450.99	814.09
排放量/t	4 407.9	1 240.2	2 238.7
航次时间/h	1 856.86	551.15	951.48
去程航速/kn	11	10.9	11.6
返程航速/kn	10.8	10.5	10
加注策略	返程加注	去程加注	去程加注
加注量/t	2 096.89	723.64	2 449.35

表6、7表明,连续航次总可用时间越长,船舶的燃料消耗和排放量越低。

### 4.3 算法计算性能测试

为评估算法计算性能,使用变邻域搜索算法对上述场景分别进行10次运算,统计最佳目标函数值、平均目标函数值等指标,具体结果见表8。

表8 算法的计算性能

Tab.8 Computational performance of the algorithm

场景	最佳目标函数值	平均目标函数值	目标函数值的偏差比/%	计算时间/s
场景1	1 216.2	1 217.4	0.10	0.6
场景2	1960.3	1 966.3	0.31	0.8
场景3	3 949.3	3 985.3	0.91	2.4
场景4	2 857.6	2 867.36	0.34	2.7
平均值	2 495.85	2 509.09	0.41	1.6

表8中目标函数值的偏差比=(平均目标函数值-最佳目标函数值)/最佳目标函数值×100%。从表8可以看出,即使该算法每次计算不一定能求得最优解,但其求得的解质量较高,经10次独立试验验证,全局最优解与平均优化目标值的波动幅度不超过1%(偏差阈值<1%)。此外,该算法的计算性能好,每个场景的平均计算时间均小于3s。

## 5 软件操作平台设计

为提升工程部署效率,开发了专用人机交互系统(见图8),集成参数配置、实时监控及结果可视化模块。其中,船舶管理人员仅需要输入每个运输航次的装卸货港口、备选的燃油加注港、航次的最长航行时间等信息,然后选定一个船舶类型,最后点击优化计算,即可得到图8所示的航次排放、燃油加注、航行时间以及各航段的航速等信息。



图8 软件操作平台

Fig.8 Software operation platform

## 6 结束语

为应对新燃料散货船在加注点稀缺条件下的航速规划与燃料补给决策难题,本研究构建了以排放最小化为目标的混合整数非线性规划模型。考虑航

次总时间和船舶速度可调范围等约束条件,并针对模型特点设计了定制化的VNS算法来高效求得高质量近似解。通过对单航次与连续航次场景的案例分折,不仅验证了模型与算法在生成最优航行方案方面的有效性,更揭示了航行时间与燃料效率的关键关系。数值结果进一步揭示:当航次时间预算更为宽裕时,船舶可显著降低平均航速运行,从而实现燃料消耗总量与碳排放量的同步下降。因此在运力相对过剩或航运市场低迷时期,建议航运企业实施降速航行策略以提升航线运营的环保效益。

## 参考文献

- [1] BROWN J, ENGLERT D, LEE Y, et al. Carbon revenues from shipping: a game-changer for the energy transition [EB/OL]. (2022-05-12) [2024-01-10]. <https://blogs.worldbank.org/en/transport/carbon-revenues-shipment-game-changer-energy-transition>
- [2] Safety4sea. Shipping emissions increase almost 5% in 2021[EB/OL]. (2022-01-31) [2024-01-10]. <https://safety4sea.com/shipping-emissions-increase-almost-5-in-2021/>
- [3] WANG C X, CHEN J J. Strategies of refueling, sailing speed and ship deployment of containerships in the low-carbon background [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017,114:142-150.
- [4] WANG S N, GAO S X, TAN T Z, et al. Bunker fuel cost and freight revenue optimization for a single liner shipping service [J]. Computers and Operations Research, 2019,111:67-83.
- [5] 林贵华,李萌,李雨薇,等.考虑硫排放控制区和碳税的班轮航速优化和燃料补给策略[J].系统工程,2020,38(2):98-108.  
LIN G H, LI M, LI Y W, et al. Speed optimization and refueling strategies in liner shipping considering sulfur emission control areas and carbon tax [J]. Systems Engineering, 2020,38(2):98-108. (in Chinese)
- [6] 刘翠莲,张群淑,魏巍.考虑碳税和易腐品的班轮加油策略与航速优化[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(11):24-31.  
LIU C L, ZHANG Q S, WEI W. Liner refueling strategy and speed optimization considering carbon tax and perishables [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021,40(11):24-31. (in Chinese)
- [7] 杨华龙,李德昌,郑建风,等.考虑易腐品运输的集装箱班轮船期设计和加油策略[J].系统工程理论与实践,2021,41(11):2963-2974.  
YANG H L, LI D C, ZHENG J F, et al. Vessel

- scheduling & refueling strategy in container liner shipping with perishable assets[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2021, 41(11):2963-2974. (in Chinese)
- [8] 李德昌, 杨华龙, 段静茹. 基于合作协议的集装箱班轮运输船期设计和加油策略联合优化[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(7):953-964.  
LI D C, YANG H L, DUAN J R. A joint optimization of vessel scheduling and refueling strategy for container liner shipping with cooperative agreements[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(7):953-964. (in Chinese)
- [9] DE A, WANG J W, TIWARI M K, et al. Hybridizing basic variable neighborhood search with particle swarm optimization for solving sustainable ship routing and bunker management problem[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3):986-997.
- [10] DAS J N, MANDAL J, DATE H, et al. Joint optimization of bunker fuel and vessel speed considering delay and carbon emission[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(10):31-36.
- [11] OMHOLT-JENSEN S, FAGERHOLT K, MEISEL F. Tramp ship routing with bunker optimization and flexible cargo quantities: case from dry bulk shipping[C]. *Computational Logistics: 14th International Conference, ICCL 2023*. Berlin, Germany: Springer, 2023, 185-201.
- [12] 赵帅奇, 杨华龙, 张井波, 等. 基于合作协议的集装箱班轮运输绿色船期设计[J]. *中国航海*, 2021, 44(4):86-93.  
ZHAO S Q, YANG H L, ZHANG J B, et al. Green voyage scheduling of container liner based on cooperation agreement[J]. *Navigation of China*, 2021, 44(4):86-93. (in Chinese)
- [13] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(5):853-865.
- (上接第120页)
- [18] MORENO GUTIÉRREZ J, PÁJARO-VELÁZQUEZ E, AMADO-SÁNCHEZ Y, et al. Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 834:575-584.
- [19] 许建华, 王忠俊. 船用柴油机排放计算方法对比[J]. *船海工程*, 2009, 38(6):73-75.  
XU J H, WANG Z J. Contrastive analysis of calculation methods of exhaust emission from marine diesel engine[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2009, 38(6):73-75. (in Chinese).
- [20] 贾建雄, 张世恒, 王忠俊. 船舶发动机排气污染物满足不同标准的差异分析[J]. *船海工程*, 2020, 49(5):23-27.  
JIA J X, ZHANG S H, WANG Z J. Difference analysis of requirements of different standards for marine engine exhaust pollutant[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(5):23-27. (in Chinese).
- [21] 邢辉. 船舶废气排放量化问题研究[D]. 大连:大连海事大学, 2017.  
XING H. Study on quantification of exhaust emissions from ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese).
- [22] 蔡尚峰. 双燃料发动机的排放算法与误差因素研究[D]. 大连:大连海事大学, 2015.  
CAI S F. Calculation of dual-fuel engine exhaust emissions and the analysis of error factors[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese).
- [23] 邢辉, 段树林, 黄连忠, 等. 基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子[J]. *环境科学*, 2016, 37(10):3750-3757.  
XING H, DUAN S L, HUANG L Z, et al. Testbed-based exhaust emission factors for marine diesel engines in China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10):3750-3757. (in Chinese).
- [24] MA Z M, DU T L, DUAN S L, et al. Analysis of exhaust pollutants from four-stroke marine diesel engines based on bench tests[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2):413.
- [25] MA Z M, YANG Y Y, SUN P T, et al. Analysis of marine diesel engine emission characteristics of different power ranges in China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(9):1108.