

考虑碳强度管理与硫排放限制的 船舶配置与调度研究

杜剑¹, 任逸卓¹, 陈奕璇¹, 张然^{1*}, 杨茗月¹, 温欣然²

(1. 大连交通大学 交通工程学院, 辽宁 大连 116028;

2. 华东师范大学 统计学院, 上海 200062)

摘要:国际海事组织(IMO)的船舶碳强度(CII)规则下,理论研究大多仅依靠减少碳排放量来管理船舶碳强度。然而,以牺牲船舶运输功为代价减少碳排放量,不再符合碳强度达峰目标。故考虑硫排放限制,建模开展燃油更换或脱硫塔改装的措施选择。结合碳强度管理,以航速范围、配船数量、碳强度达标为约束,提出船舶配置与调度问题的决策模型。针对所提出的混合整数非线性规划模型,设计了线性化与 CPLEX 的混合算法。以中远海运5条航线进行验证,结果表明:与遗传算法相比,本文混合算法求解时间略增7.6%,但运营成本降低33.4%,且方案满足所有工程约束;无碳强度管理时,部分航线碳强度恶化至不合规,证实碳强度管理可有效规避船舶降级停航风险。基于上述结果得到管理启示:1)为降低船队油耗,班轮公司在满足货运需求前提下应减少船舶载重吨,并在调节范围内降低航速。为降低船队碳强度,除在调节范围内降低航速外,还应承揽更多货运需求以提升船舶载重吨。2)折减系数增大会提高碳强度要求,而受最小最大航速限制,碳强度管理需配置更大容量船舶。为避免碳强度不达标与船舶满载率过低,班轮公司应聚焦借助货运需求增加来提高运输功。

关键词:绿色航运; 船舶配置与调度; 混合整数非线性规划; 碳强度管理; 硫排放限制; 混合算法

中图分类号:U692.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.018

Ship deployment and scheduling considering carbon intensity management and sulfur emission limits

Du Jian¹, Ren Yizhuo¹, Chen Yixuan¹, Zhang Ran^{1*}, Yang Mingyue¹, Wen Xinran²

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. School of Statistics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Under the Carbon Intensity Indicator (CII) rules of the International Maritime Organization (IMO), most theoretical studies manage ship carbon intensity primarily by reducing carbon emissions. However, reducing carbon emissions at the expense of ship transport work no longer aligns with the goal of carbon peaking intensity. Therefore, considering sulfur emission limits, a model was developed to determine whether fuel switching or scrubber retrofitting should be adopted. Combining with carbon intensity management, a decision model for the ship deployment and scheduling problem is proposed, subject to the constraints on sailing speed, fleet deployment, and carbon intensity compliance. To solve the proposed mixed-integer nonlinear programming model, a hybrid algorithm combining linearization and CPLEX is designed. The model is validated using five routes operated by COSCO Shipping. The results show that, compared with the genetic algorithm, the proposed hybrid algorithm increases the solution time slightly by 7.6%, while reducing the operating cost significantly by 33.4%, and all solutions satisfy the engineering constraints. Without carbon intensity management, the carbon intensity of some routes deteriorates to a non-compliant level, which confirms that carbon intensity management

收稿日期:2025-02-25

基金项目:辽宁省社会科学规划基金项目(L24CGL008)资助

作者简介:杜剑(1991—),男,副教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。*通信作者:zhangran@djtu.edu.cn

引用格式:杜剑,任逸卓,陈奕璇,等.考虑碳强度管理与硫排放限制的船舶配置与调度研究[J].中国航海,2026,49(2):153-163.

Du J, Ren Y Z, Chen Y X, et al. Ship deployment and scheduling considering carbon intensity management and sulfur emission limits [J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 153-163. (in Chinese)

can effectively reduce the risk of ship downgrade and service suspension. Based on the above results, two managerial insights are obtained. First, to reduce fleet fuel consumption, liner companies should reduce ship deadweight while still meeting cargo demand, and lower sailing speed within the allowable range. To reduce fleet carbon intensity, besides lowering speed within the allowable range, liner companies should also increase cargo demand to increase ship deadweight. Second, a higher reduction factor imposes stricter carbon intensity requirement. Limited by the minimum and maximum sailing speeds, carbon intensity management requires the deployment of ships with larger deadweight. To avoid carbon intensity non-compliance and excessively low ship loading rate, liner companies should focus on improving transport work by increasing cargo demand.

Key words: green shipping; ship deployment and scheduling; mixed-integer nonlinear programming; carbon intensity management; sulfur emission limits; hybrid algorithm

海上运输总量占全球贸易总量的80%,但也释放了全球排放总量接近3%的温室气体,对人类健康和全球环境产生有害影响。为给全球碳减排进程贡献航运力量,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)2022年修订了《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL公约)附件六,并补充了营运碳强度规则。船舶营运碳强度(Carbon Intensity Indicator, CII)指单位运输功的平均碳排放量,而运输功为航行里程与载重吨的乘积。营运碳强度规则定义了碳强度基线、折减系数、要求碳强度、实际碳强度、能效评级边界等,并要求碳强度不合规船舶采取纠正行动。IMO海上环境保护委员会第80届会议(MEPC 80)决议通过了《2023年IMO船舶温室气体减排战略》,使得营运碳强度管理比以往任何时间都更迫切^[1]。碳强度不合规不仅会干扰自有船舶的日常运营,还会降低二手船的买卖及租赁价值^[2]。由于碳强度等于碳排放量除以船舶运输功,前者主要受船舶速度影响,而后者主要受调配航线影响。对此,本文拟考虑碳强度管理开展船舶配置与调度研究,合理决策调配航线与船舶航速。

部分学者在船舶配置与调度研究中引入了碳排放量最少目标,旨在通过降低碳排放量实现船舶碳强度管理。Maloni等^[3]尝试量化船舶降速航行对承运人和托运人的收入成本影响,研究结果证明了降速航行措施的合理性。Yin等^[4]研究了降速航行措施是如何节省燃油消耗以及降低污染排放,并探讨了该措施对集装箱运输时间延长的不利影响。Lee等^[5]指出虽然船舶低速航行时燃油消耗率更低,但航行时间会延长且延误概率会增加,故提出了一种航行时间、燃油成本与船期可靠性的量化方法。Qi等^[6]根据给定的在港时间分布与服务频率,以最小化燃油消耗及碳排放量为优化目标,同步优化各航段船舶速度以及各港口到港时间。Wang等^[7]建立了不征收碳排放税、对超额排放量征税、对碳排放全额征税三种计费方法下的航速优化模型。Cheaitou

等^[8]兼顾利润最大、CO₂排放最少及SO_x排放最少目标,建立了一个船舶航速优化的多目标模型。Pasha等^[9]考虑了航程中的船舶污染排放,对异构船队的配置与调度问题展开研究。

IMO引入控制排放区(Emission Control Area, ECA)后,船舶需要采用脱硫措施来满足硫排放要求。故部分学者在船舶配置与调度研究中引入了硫排放限制,借脱硫措施来同步降低硫碳排放^[10]。Zhen等^[11]综合比选燃油更换、脱硫塔、船舶岸电三种绿色技术,并对船队配置与调度展开优化决策。Zhao等^[12]考虑燃油更换、脱硫塔、液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)燃料三种绿色技术,在不确定环境下开展船舶租售、配置与调度问题的集成优化。Wang等^[13]考虑ECA硫排放限制,对船队部署、船期计划、船舶路径以及速度开展集成优化。Ma等^[14]考虑ECA的硫排放约束,构建了一个联合优化航线、速度及加油的混合整数非线性规划模型。Lee等^[15]研究不确定天气条件下ECA内外的船舶速度及路径决策,并比较分析了燃油更换与脱硫塔的经济性。Lan等^[16]考虑硫排放限制以及碳减排目标,对航线设计、船队配置以及集装箱路径问题开展集成优化。Zhao等^[17]在ECA规定下开展船队配置、船期设计以及航速集成优化。DU等^[18]比选了燃油更换、脱硫塔、船舶岸电以及LNG燃料四种绿色技术,在运营成本小与硫碳排放少的多重目标下开展异构船队配置与调度研究。

以往研究存在两点不足。一是,碳排放量最少目标下船舶会低速航行,这导致所吸引货物减少以及载重吨下降。此时,船舶碳排放量有所减少,但船舶运输功也会降低。故有必要均衡碳排放量与船舶运输功,并开展营运碳强度管理。二是,采用燃油更换或改装脱硫塔可以满足硫排放限制,但无法有效降低碳排放量^[18]。然而,碳排放量减少不能以增加硫排放量为代价,故有必要同步关注硫排放限制与碳强度管理。

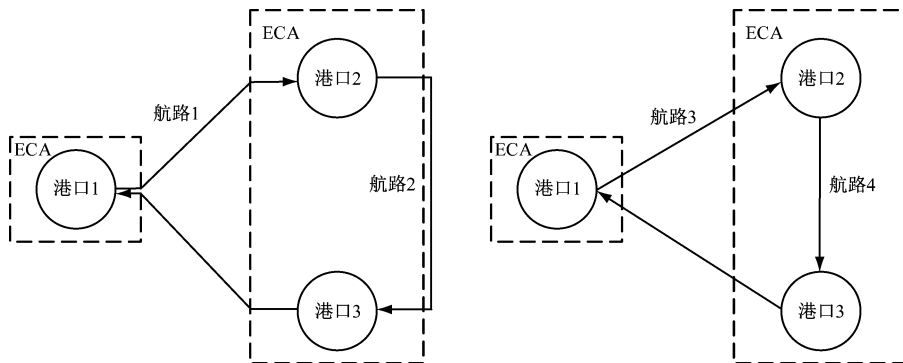
相比于以往文献,本文的研究贡献如下:1)在环境规制方面,本文同时引入了硫排放相关的 ECA 规则与碳排放相关的 CII 规则,开展不同脱硫措施的选择决策。2)在模型创新方面,本文提出了决策船舶数量与速度的混合整数非线性规划模型,并设计了线性化与 CPLEX 的混合算法。3)在管理应用方面,探讨了 ECA 与 CII 规则对船队配置与调度问题的影响,为航运公司在不同环境规制下的船舶运营提供决策工具。

1 问题描述

对于硫排放限制,IMO 于 2015 年 MARPOL 公约附件六中引入了 ECA。船舶可在 ECA 内使用硫含量不超过 0.1% 的燃料,在 ECA 外使用硫含量低于 3.5% 的燃料。之后,IMO 决定从 2020 年开始将全球硫含量降至 0.5%。为满足硫排放限制,船舶可选择 ECA 外使用低硫重油(Low Sulfur Heavy Oil,LSHO),而 ECA 内更换为低硫轻油(Low Sulfur Light Oil,LSLO)。由于低硫轻油价格显著更高,船舶航路不再是两港间总里程最短,而分别是 ECA 内外里

程最短。另外,由于提高航速会增加燃油消耗,通常 ECA 内航速是低于 ECA 外航速的。除了燃油更换措施,船舶还可以选择改装脱硫塔,并在 ECA 内外均使用价格更低的高硫重油(High Sulfur Heavy Oil,HSHO)。图 1a 是船舶采用燃油更换时 ECA 内外最短航路,图 1b 是船舶改装脱硫塔时全程最短航路。船舶配置与调度研究中,本文会兼顾 ECA 内外的航路与航速差异,对燃油更换或脱硫塔开展措施选择。

对于碳强度管理,碳强度指标计算与等级评价需要五步计算逻辑,见图 2。1)根据载重吨与计算参数来计算碳强度基线。不同船型的计算参数有不同取值,例如:集装箱船分别为 1 984 与 0.489,散货船分别为 4 745 与 0.622。2)根据折减系数与碳强度基线来计算要求碳强度。2024 ~ 2026 年的折减系数分别为 7%、9% 与 11%,表明碳强度要求越来越高。3)根据要求碳强度与计算参数来开展船舶营运能效表现评价。船舶营运能效评级框架,见图 3,四个评价边界构成了优秀、良好、中等、稍差、低劣的五个能效评级,依次被赋予碳强度 A 级到 E 级。4)根据碳排放量与船舶运输功来计算实际碳强



(a) 船舶采用燃油更换时 ECA 内外最短航路

(b) 船舶改装脱硫塔时全程最短航路

图 1 ECA 内外的船舶航路

Fig. 1 Vessel routes inside and outside ECA

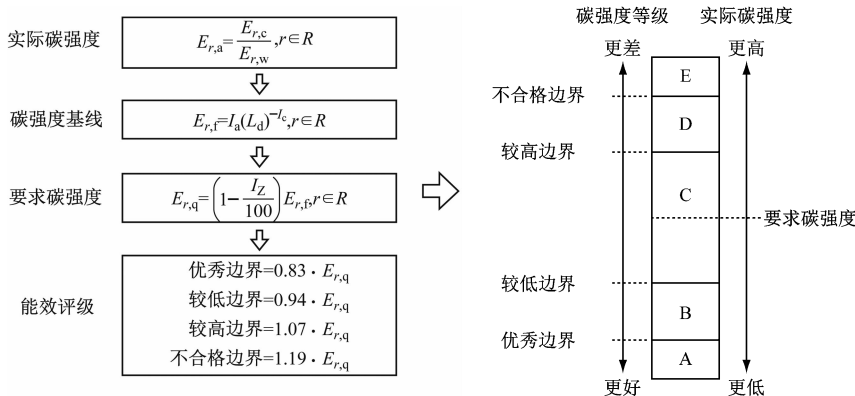


图 2 碳强度计算逻辑框图

Fig. 2 Carbon intensity calculation flowchart

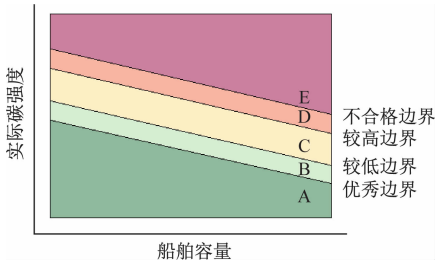


图3 营运能效评级框架

Fig.3 Operational energy efficiency rating framework

度。其中,碳排放量取决于燃油消耗与碳转换系数,而船舶运输功取决于载重吨与航行里程。5)将基于运营数据获得的实际碳强度与基于要求碳强度所得的能效评级进行对比,可以评价船舶碳强度的A级到E级。如果船舶当年评级为E或连续三年评级为D,认为碳强度不达标且需要停航整改。船舶配置与调度研究中,需要借助航速决策来控制碳排放量、借助调配航线来影响运输功,避免碳强度不达标情况。

2 船舶配置与调度问题的混合整数非线性规划模型

2.1 符号定义

2.2 模型假设

- 1) 航线网络中挂靠港口与挂靠顺序是提前给定的,服务频率固定为每周一班。
- 2) 每个港口的集装箱装卸需求已知(TEU),这些数据可通过历史记录进行估算。
- 3) 不穿越 ECA 航路的全程里程已知,穿越 ECA 航路的 ECA 内外里程已知。
- 4) 船舶租金、容量、航行与在港油耗、最小最大

$$C_{ri,s} = Y_r \left[p_E a_E (v_{ri,E})^{b_E} \frac{d_{ri,E}}{v_{ri,E}} + p_N a_N (v_{ri,N})^{b_N} \frac{d_{ri,N}}{v_{ri,N}} \right] + (1 - Y_r) \left[p_S a_S (v_{ri,N})^{b_S} \frac{d_{ri,N}}{v_{ri,N}} \right], r \in R, i \in I_r \quad (10)$$

$$C_{ri,p} = t_{ri,p} \{ Y_r [U_{i,E} p_E \beta_E + (1 - U_{i,E}) p_N \beta_N] + (1 - Y_r) p_S \beta_S \} + p_L L_d t_{ri,p}, r \in R, i \in I_r \quad (11)$$

式(2)~式(10)是船舶配置与调度相关约束。其中,式(5)~式(7)用于计算不同脱硫措施下的ECA内外航行时间,式(9)~式(11)用于计算结合不同脱硫措施的船舶各项成本。式(2)将各航线上的航次开始时间赋值为0。式(3)计算了除始发港外其他各港口的船舶到港时间。式(4)用于计算航线上各港口的船舶作业时间。式(5)考虑燃油更换或脱硫塔改装措施,计算了航线上各航段的船舶航行时间。式(6)~式(7)约束 ECA 内外航速在最小最大航速范围内。式(8)约束配船数量能满足周一班服务。式(9)考虑脱硫塔改装成本、采用燃油更换或脱硫塔的固定成本,计算了各航线上的船舶固

航速是同质的。

5) 脱硫塔改装成本与船舶固定成本是已知的。

2.3 模型构建

船舶配置与调度问题的优化目标是运营成本最小化,包括固定成本、航行成本与在港成本三部分。由于脱硫塔改装与配船决策是整型变量,ECA 内外航速是连续型变量,所以本文问题需构建一个混合整数规划模型。进一步地,由于碳强度管理相关约束是非线性的,故需要构建下述的混合整数非线性规划模型。

1) 目标函数

$$\sum_{r \in R} C_{r,f} + \sum_{r \in R} \sum_{i \in I_r} C_{ri,p} + \sum_{r \in R} \sum_{i \in I_r} C_{ri,s} \quad (1)$$

式(1)是本文模型的目标函数,等号右侧依次为船队的固定成本、航行成本与在港成本。

2) 船舶配置与调度

$$t_{r1,a} = 0, r \in R \quad (2)$$

$$t_{r(i+1),a} = t_{ri,a} + t_{ri,p} + t_{ri,s}, r \in R, i \in I_r \quad (3)$$

$$t_{ri,p} = \frac{D_{ri,h} + D_{ri,d}}{\rho}, r \in R, i \in I_r \quad (4)$$

$$t_{ri,s} = Y_r \left(\frac{d_{ri,E}}{v_{ri,E}} + \frac{d_{ri,N}}{v_{ri,N}} \right) + (1 - Y_r) \frac{d_{ri,N}}{v_{ri,N}}, r \in R, i \in I_r \quad (5)$$

$$v_m \leq v_{ri,E} \leq v_x, r \in R, i \in I_r \quad (6)$$

$$v_m \leq v_{ri,N} \leq v_x, r \in R, i \in I_r \quad (7)$$

$$Q_r \geq \frac{t_{r(N_r+1),a}}{168}, r \in R \quad (8)$$

$$C_{r,f} = Q_r [m_s (1 - Y_r) + c_s (1 - Y_r) + c_\phi Y_r], r \in R \quad (9)$$

定成本。式(10)考虑了采用燃油更换或脱硫塔的 ECA 内外航路差异,计算了各航线上的船舶航行成本。式(11)考虑了使用不同油品的在港油耗成本以及载重吨决定的港口使费,计算了各航线上的船舶在港成本。

3) 营运碳强度管理

$$E_{r,f} = I_a (L_d)^{-l_e}, r \in R \quad (12)$$

$$E_{r,q} = \left(1 - \frac{I_z}{100} \right) E_{r,f}, r \in R \quad (13)$$

$$E_{r,a} = \frac{E_{r,c}}{E_{r,w}}, r \in R \quad (14)$$

$$E_{r,v} = \frac{168 \cdot T_{r,p}}{t_{r(L_r+1),a}}, r \in R \quad (15)$$

表 1 模型符号

Tab.1 Notations of the model

符号	定义	符号	定义	
集合	$r \in R$	班轮航线的集合,其中航线 r 代表第 r 条航路	$D_{ri,h}$	航线 r 航段 i 的装箱需求
	$i \in I_r$	挂靠港口的集合,其中港口 i 代表第 i 条港口,航段 i 代表港口 i 到港口 $i+1$ 间航行路径	$D_{ri,d}$	航线 r 航段 i 的卸箱需求
参数	$U_{i,E}$	等于 1 代表港口 i 位于 ECA 内	ρ	港口的装卸效率
	$d_{ri,E}$	航线 r 航段 i 的船舶 ECA 内的航行里程	参数 I_Z	碳强度的折减系数
	$d_{ri,N}$	航线 r 航段 i 的船舶 ECA 外的航行里程	I_a, I_c	碳强度基线的计算参数
	L_d	船舶载重吨,单位为 t	$E_{r,s}$	航线 r 上船舶之前碳强度评级
	v_m	船舶最小速度	$T_{r,p}$	航线 r 上船舶年度运营天数
	v_x	船舶最大速度	$t_{ri,p}$	航线 r 港口 i 的船舶在港时间
	m_s	船舶配备脱硫塔时的改装成本	$t_{ri,s}$	航线 r 航段 i 的船舶航行时间
	c_ϕ	船舶采用燃油更换时的固定成本	$t_{ri,a}$	航线 r 港口 i 的船舶到港时间
	c_s	船舶配备脱硫塔时的固定成本	$C_{r,f}$	航线 r 的船舶固定成本
	a_E, b_E	船舶使用 LSLO 时航行油耗参数	$C_{ri,p}$	航线 r 港口 i 的船舶在港成本
	a_N, b_N	船舶使用 LSHO 时航行油耗参数	$C_{ri,s}$	航线 r 航段 i 的船舶航行成本
	a_S, b_S	船舶使用 HSHO 时航行油耗参数	$E_{r,f}$	航线 r 上船舶碳强度基线
	β_E	船舶使用 LSLO 时在港油耗参数	$E_{r,q}$	航线 r 上船舶需求碳强度
	β_N	船舶使用 LSHO 时在港油耗参数	$E_{r,a}$	航线 r 上船舶实际碳强度
	β_S	船舶使用 HSHO 时在港油耗参数	$E_{r,v}$	航线 r 上船舶年度航次数
	e_E	船舶使用 LSLO 时碳转换系数	变量 $E_{r,c}$	航线 r 上船舶碳排放量
	e_N	船舶使用 LSHO 时碳转换系数	$E_{r,w}$	航线 r 上船舶运输功
	e_S	船舶使用 HSHO 时碳转换系数	$E_{r,e}$	航线 r 上船舶碳强度评级
	p_E	LSLO 每吨油耗成本	Y_r	使用燃油更换或脱硫塔的 0/1 决策变量。等于 1 表示采用燃油更换,等于 0 表示改装脱硫塔
	p_N	LSHO 每吨油耗成本	Q_r	航线 r 上配船数量的决策变量
	p_S	HSHO 每吨油耗成本	$v_{ri,E}$	航线 r 航段 i 上 ECA 内航速的决策变量
	p_L	单位容量的船舶港口使费	$v_{ri,N}$	航线 r 航段 i 上 ECA 外航速的决策变量
	Q_x	最大的配船数量		

$$E_{r,c} = E_{r,v} \left\{ Y_r \left[e_E \sum_{i \in I_r} a_E (v_{ri,E})^{b_E} \frac{d_{ri,E}}{v_{ri,E}} + e_N \sum_{i \in I_r} a_N (v_{ri,N})^{b_N} \frac{d_{ri,N}}{v_{ri,N}} \right] + (1 - Y_r) \left[e_S \sum_{i \in I_r} a_S (v_{ri,N})^{b_S} \frac{d_{ri,N}}{v_{ri,N}} \right] \right\}, r \in R \quad (16)$$

$$E_{r,w} = E_{r,v} L_d \left[Y_r \sum_{i \in I_r} (d_{ri,E} + d_{ri,N}) + (1 - Y_r) \sum_{i \in I_r} d_{ri,N} \right], r \in R \quad (17)$$

$$E_{r,e} = \begin{cases} 5, & \text{if } E_{r,a} > 1.19 \cdot E_{r,q} \\ 4, & \text{if } 1.07 \cdot E_{r,q} \leq E_{r,a} \leq 1.19 \cdot E_{r,q} \\ 3, & \text{if } 0.94 \cdot E_{r,q} \leq E_{r,a} \leq 1.07 \cdot E_{r,q}, r \in R \\ 2, & \text{if } 0.83 \cdot E_{r,q} \leq E_{r,a} \leq 0.94 \cdot E_{r,q} \\ 1, & \text{if } E_{r,a} \leq 0.83 \cdot E_{r,q} \end{cases} \quad (18)$$

$$E_{r,e} + E_{r,s} < 5, r \in R \quad (19)$$

式(11)~式(19)是营运碳强度管理相关约束。其中,式(12)~式(17)用于计算船舶营运碳强度指数,式(18)~式(19)用于评价碳强度等级以及判断碳强度达标。式(12)根据集装箱船的载重吨与计算参数来获取碳强度基线。式(13)根据年度折减系数与碳强度基线来计算要求碳强度。式(14)用碳排放量与船舶运输功来计算要求碳强度。式(15)根据年度运营天数与航次往返时间来计算年度航次数, $(I_r + 1)$ 表示航次结束后返回起始港。式(16)考虑了采用燃油更换或脱硫塔的 ECA 内外航路与航速差异, 计算了船舶的年度碳排放量。式(17)考虑了采用燃油更换或脱硫塔的 ECA 内外航路与航速差异, 用船舶载重吨与年度航行里程来计算船舶运输功。式(18)基于船舶能效评价框架确定了当年碳强度等级, 数值 1~5 分别代表碳强度等级 A~E。式(19)结合之前碳强度等级, 对当年 D 级或 E 级船舶开展碳强度不合规判断, 可以解释为: a) 之前碳强度为 E 级时赋值为 5, 即便当年碳强度为 A 级, 该船当年不合规。b) 之前连续两年碳强度为 D 级时赋值为 1, 如果当年碳强度为 D 级, 该船

$$C_{ri,s} = p_E a_E (u_{ri,E})^{-b_E+1} d_{ri,E} + p_N a_N (u_{ri,N})^{-b_N+1} d_{ri,N}, r \in R, i \in I_r \quad (22)$$

$$1/v_x \leq u_{ri,E}, u_{ri,N} \leq 1/v_m, r \in R, i \in I_r \quad (23)$$

$$C_{r,f} = Q_r c_\phi, r \in R \quad (24)$$

$$E_{r,u} = \frac{e_E \sum_{i \in I_r} a_E (u_{ri,E})^{-b_E+1} d_{ri,E} + e_N \sum_{i \in I_r} a_N (u_{ri,N})^{-b_N+1} d_{ri,N}}{L_d \sum_{i \in I_r} (d_{ri,E} + d_{ri,N})}, r \in R \quad (26)$$

式(25)~式(26)中 $(u_{ri,E})^{-b_E+1}$, $(u_{ri,N})^{-b_N+1}$ 仍是非线性的, 拟借助外逼近法开展线性化^[19]。以 $u_{ri,E}$ 为例做解释, 切线生成示意图 4。找到变量 $u_{ri,E}$ 最逼近值 $u_{riz,E}$ 及切线斜率 $[(u_{ri,E})^{-b_E+1} - (u_{riz,E})^{-b_E+1}] / (u_{ri,E} - u_{riz,E}) = (-b_E + 1)(u_{riz,E})^{-b_E}$, 并将切线转化为 $(u_{ri,E})^{-b_E+1} = u_{ri,E}(-b_E + 1)(u_{riz,E})^{-b_E} - b_E(u_{riz,E})^{-b_E+1}$ 。

之后, 用式(27)~式(29)寻找最逼近值 $u_{riz,E}$, 用式(30)~式(32)寻找最逼近值 $u_{riz,N}$; 用式(33)估值式(25)的航行成本 $C_{ri,s}$, 用式(34)估值式(26)的实际碳强度上限 $E_{r,u}$ 。

$$u_{riz,E} = z_{ri,E} / d_{ri,E}, r \in R, i \in I_r \quad (27)$$

当年不合规。c) 如果当年碳强度为 E 级, 该船当年不合规。

4) 决策变量

$$Y_r \in \{0, 1\}, r \in R \quad (20)$$

$$Q_r \in \partial^+, r \in R \quad (21)$$

式(20)~式(21)是决策变量的范围约束。式(20)要求采用燃油更换的决策变量为 0/1 变量, 式(21)要求各航线上的配船数量为正整数。

3 线性化与 CPLEX 相结合的模型求解算法

式(5)~式(7)、式(9)~式(10)、式(16)~式(18)都是非线性的, 本文拟结合线性化与 CPLEX 开展模型求解。以往文献认为脱硫塔改装、航速降低可以同时减少硫排放与碳排放, 脱硫塔相比于燃油更换的减排效果更强。如果燃油更换能满足式(19)的碳强度约束, 则脱硫塔同样满足碳强度约束。假设所有船舶均采用燃油更换来脱硫, 将 $Y_r, r \in R$ 赋值为 1。

1) 航速-油耗函数线性化

为线性化式(5)的速度函数设置变量 $u_{ri,E} = 1/v_{ri,E}$, $u_{ri,N} = 1/v_{ri,N}$, 则式(5)~式(7)可以转化为线性式(22)~式(23)。采用燃油更换措施来脱硫, 式(9)~式(10)可以转化为式(24)~式(25), 式(16)~式(17)转化为式(26)的实际碳强度上限 $E_{r,u}$ 。

$$t_{ri,s} = d_{ri,E} u_{ri,E} + d_{ri,N} u_{ri,N}, r \in R, i \in I_r \quad (22)$$

$$1/v_x \leq u_{ri,E}, u_{ri,N} \leq 1/v_m, r \in R, i \in I_r \quad (23)$$

$$C_{r,f} = Q_r c_\phi, r \in R \quad (24)$$

$$C_{ri,s} = p_E a_E (u_{ri,E})^{-b_E+1} d_{ri,E} + p_N a_N (u_{ri,N})^{-b_N+1} d_{ri,N}, r \in R, i \in I_r \quad (25)$$

$$E_{r,u} = \frac{e_E \sum_{i \in I_r} a_E (u_{ri,E})^{-b_E+1} d_{ri,E} + e_N \sum_{i \in I_r} a_N (u_{ri,N})^{-b_N+1} d_{ri,N}}{L_d \sum_{i \in I_r} (d_{ri,E} + d_{ri,N})}, r \in R \quad (26)$$

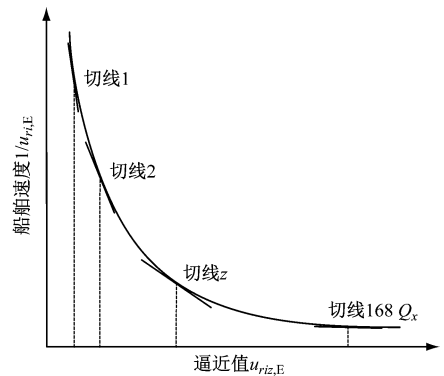


图4 外逼近法的切线示意

Fig. 4 Tangent illustration of outer approximation method

$$z_{ri,E} \in \{1, 2, \dots, 168 Q_x\}, r \in R, i \in I_r \quad (28)$$

$$u_{ri(z-1),E} \leq u_{ri,E} \leq u_{riz,E}, r \in R, i \in I_r \quad (29)$$

$$z_{ri,N} \in \{1, 2, \dots, 168Q_x\}, r \in R, i \in I_r \quad (31)$$

$$u_{riz,N} = z_{ri,N}/d_{ri,N}, r \in R, i \in I_r \quad (30)$$

$$u_{ri(z-1),N} \leq u_{ri,N} \leq u_{riz,N}, r \in R, i \in I_r \quad (32)$$

$$C_{ri,s} = p_E a_E [u_{ri,E}(-b_E + 1)(u_{riz,E})^{-b_E} - b_E(u_{riz,E})^{-b_E+1}] d_{ri,E} + p_N a_N [u_{ri,N}(-b_N + 1)(u_{riz,N})^{-b_N} - b_N(u_{riz,N})^{-b_N+1}] d_{ri,N}, r \in R, i \in I_r \quad (33)$$

$$E_{r,u} = \frac{e_E \sum_{i \in I_r} a_E [u_{ri,E}(-b_E + 1)(u_{riz,E})^{-b_E} - b_E(u_{riz,E})^{-b_E+1}] d_{ri,E} + e_N \sum_{i \in I_r} a_N [u_{ri,N}(-b_N + 1)(u_{riz,N})^{-b_N} - b_N(u_{riz,N})^{-b_N+1}] d_{ri,N}}{L_d \sum_{i \in I_r} (d_{ri,E} + d_{ri,N})}, r \in R \quad (34)$$

2) 碳强度评级函数线性化

$$E_{r,u} \geq 1.19 \cdot E_{r,q} y_{r,5}, r \in R \quad (42)$$

为线性化式(18)的分段函数,引入一组 0/1 变量 $y_{r,5}, y_{r,4}, y_{r,3}, y_{r,2}, y_{r,1}$ 以及极大值 M ,任一变量等于 1 表明函数该分段被满足。举例如: $y_{r,3} = 1$ 时 $y_{r,5} + y_{r,4} + y_{r,2} + y_{r,1} = 0$, 碳强度等级 $E_{r,e} = 3$ 。式(38)~式(39)、式(41)~式(42)皆表现为 $E_{r,u}$ 大于等于 0 且小于等于极大值 M ,式(40)表现为 $0.94 \cdot E_{r,q} \leq E_{r,u} \leq 1.07 \cdot E_{r,q}$ 。

至此,式(1)~式(21)的混合整数非线性规划模型可以完全转化为线性模型。线性模型的目标函数为式(1),约束条件包括式(2)~式(4)、式(8)、式(11)~式(13)、式(19)~式(21)、式(22)~式(24)、式(27)~式(34)、式(35)~式(42)。

4 算例设计

4.1 背景及数据

以中远海运的 5 艘集装箱班轮航线作为算例背景,开展验证试验设计。将新加坡-东非、中国-澳大利亚、中国-印度东、中国-美西、中国-北欧 5 条航线绘制,见图 5。中国-美西航线会穿越北美 ECA,中国-北欧航线会穿越波罗的海和北海 ECA。将各航线的航行里程与装卸需求,见表 2。将 5 000 TEU、10 000 TEU 船型的技术及运营参数,见表 3^[20]。HSHO、LSLO、LSHO 的碳转换系数分别为 3.114、3.151、3.114 吨二氧化碳/吨燃油,燃油价格分别为 2 920、5 475、4 015 元/吨^[21]。

$$E_{r,e} = 5y_{r,5} + 4y_{r,4} + 3y_{r,3} + 2y_{r,2} + y_{r,1}, r \in R \quad (35)$$

$$y_{r,5}, y_{r,4}, y_{r,3}, y_{r,2}, y_{r,1} \in \{0, 1\}, r \in R \quad (36)$$

$$y_{r,5} + y_{r,4} + y_{r,3} + y_{r,2} + y_{r,1} = 1, r \in R \quad (37)$$

$$E_{r,u} \leq 0.83 \cdot E_{r,q} + M(1 - y_{r,1}), r \in R \quad (38)$$

$$0.83 \cdot E_{r,q} y_{r,2} \leq E_{r,u} \leq 0.94 \cdot E_{r,q} + M(1 - y_{r,2}), r \in R \quad (39)$$

$$0.94 \cdot E_{r,q} y_{r,3} \leq E_{r,u} \leq 1.07 \cdot E_{r,q} + M(1 - y_{r,3}), r \in R \quad (40)$$

$$1.07 \cdot E_{r,q} y_{r,4} \leq E_{r,u} \leq 1.19 \cdot E_{r,q} + M(1 - y_{r,4}), r \in R \quad (41)$$



图 5 中远海运航线网络

Fig. 5 COSCO Shipping route network

4.2 可行性验证

不开展函数线性化时,本文的混合整数非线性

规划模型需要采用遗传算法来求解。使用 MATLAB 2018a 编码遗传算法,并借助 YALMIP 工具箱调用

表2 航行里程与装卸需求

Tab.2 Sailing distances and loading/unloading demands

航线	港口数/个	ECA 外里程	ECA 内里程	装箱需求	卸箱需求
新加坡-东非	4	207, 1 409, 2 603, 4 065	0, 0, 0, 0	2 000, 3 200, 4 100, 4 300	2 900, 4 100, 3 500, 3 100
中国-澳大利亚	5	292, 4 115, 567, 640, 5 122	0, 0, 0, 0, 0	3 700, 3 400, 4 100, 2 900, 3 500	3 200, 4 500, 3 670, 2 300, 3 930
中国-印度东	5	873, 673, 1 534, 330, 2 869	0, 0, 0, 0, 0	3 500, 2 900, 3 100, 3 900, 4 600	4 700, 3 000, 3 900, 4 300, 2 100
中国-美西	7	66, 749, 245, 4 636, 0, 0, 6 375	0, 0, 0, 349, 660, 975, 448	2 900, 3 500, 3 100, 4 300, 4 700, 6 000, 6 200	5 100, 5 400, 5 800, 3 400, 2 700, 3 700, 4 600
中国-北欧	7	245, 749, 1 472, 8 448, 0, 0, 10 560	0, 0, 0, 355, 289, 299, 343	6 700, 6 300, 6 950, 7 700, 7 300, 7 100, 8 800	6 400, 6 900, 7 600, 7 300, 5 600, 8 700, 8 350

表3 船舶技术及运营参数

Tab.3 Vessel technical and operational parameters

集装箱数	5 000 TEU	10 000 TEU	集装箱数	5 000 TEU	10 000 TEU
船舶载重吨/吨	62 000	110 000	燃油更换固定成本 $\times 10^5 / (\text{元}/\text{周})$	16.15	20.24
年度运营天数/天	330	290	LSLO 航行油耗 $\times 10^{-3}$	9.5	10.4
之前碳强度等级	C 级	B 级	LSHO 航行油耗 $\times 10^{-3}$	8.8	9.1
最小航速/节	15	17	HSO 航行油耗 $\times 10^{-3}$	8.8	9.1
最大航速/节	20	22	LSLO 在港油耗/(吨/时)	0.150	0.150
脱硫塔改装成本 $\times 10^5 / (\text{元}/\text{周})$	7.455	7.455	LSHO 在港油耗/(吨/时)	0.125	0.125
脱硫塔固定成本 $\times 10^5 / (\text{元}/\text{周})$	16.200	20.300	HSO 在港油耗/(吨/时)	0.125	0.125

CPLEX。将遗传算法与混合算法进行结果对比,计算时间节省了 7.6%,但运营成本大幅增加了 33.4%。可见,本文的线性化与 CPLEX 混合算法是可行的。接着将混合算法所得方案列于表 4,分析可知:ECA 内外航速均在最小最大航速范围内,式

(6)~式(7)的航速约束得到满足。各航线配船数量均满足往返天数限制,式(8)的配船约束得到满足。各航线均没有出现碳强度 E 级的船舶,式(19)的碳强度约束得到满足。可见,本文模型的可行性得到了验证。

表4 船舶配置与调度方案

Tab.4 Vessel deployment and scheduling schemes

航线	脱硫措施	碳强度	船舶配置	ECA 外航速	ECA 内航速
新加坡-东非	燃油更换	D 级	3 艘小船	18, 18, 18, 18	0, 0, 0, 0
中国-澳大利亚	燃油更换	D 级	4 艘小船	18, 18, 18, 18, 18	0, 0, 0, 0, 0
中国-印度东	燃油更换	D 级	3 艘大船	20, 20, 20, 20, 20	0, 0, 0, 0, 0
中国-美西	脱硫塔	C 级	6 艘大船	20, 20, 20, 20, 0, 0, 20	0, 0, 0, 17, 17, 17, 17
中国-北欧	脱硫塔	C 级	9 艘大船	20, 20, 20, 20, 0, 0, 20	0, 0, 0, 17, 17, 17, 17

4.3 有效性验证

设计有无碳强度管理的对比试验,隐藏碳强度

约束式(12)~式(19)。将无碳强度管理的船舶配置与调度方案列于表 5,计算新方案的碳强度并列

于表5第三列。对比表4与表5可知:1)第二列中5条航线的脱硫措施没有改变,这是因为船舶采用脱硫塔或燃油更换对碳排放量影响不大,不会影响碳强度约束是否满足。2)无碳强度约束后,中国-印度东航线为降低成本,大船转变为小船且航速有所下降。然而,碳强度因载重吨降低而转变为E级,

出现了不达标情况。3)无碳强度约束后,其他四条航线的船舶碳强度、船舶配置、ECA内外航速没有发生变动,这说明碳强度管理不会明显影响船舶配置与调度方案及成本。至此,碳强度管理的有效性得到验证,其能避免船舶碳强度不达标。

表5 无碳强度管理的船舶配置与调度方案

Tab.5 Vessel deployment and scheduling schemes without carbon intensity management

航线	脱硫措施	碳强度	船舶配置	ECA 外航速/节	ECA 内航速/节
新加坡-东非	燃油更换	D级	3艘小船	18, 18, 18, 18	0, 0, 0, 0
中国-澳大利亚	燃油更换	D级	4艘小船	18, 18, 18, 18, 18	0, 0, 0, 0, 0
中国-印度东	燃油更换	E级	3艘小船	18, 18, 18, 18, 18	0, 0, 0, 0, 0
中国-美西	脱硫塔	C级	6艘大船	20, 20, 20, 20, 0, 0, 20	0, 0, 0, 17, 17, 17, 17
中国-北欧	脱硫塔	C级	9艘大船	20, 20, 20, 20, 0, 0, 20	0, 0, 0, 17, 17, 17, 17

4.4 折减系数敏感性

根据MARPOL公约附件六的折减系数规定,2024~2026年的折减系数分别为7%、9%、11%,这意味着营运碳强度要求越来越高。为探究折减系数增长对船舶碳强度的影响,模拟折减系数2024~2026年均增加2%,2027~2028年均增加4%。重新计算不同折减系数下的船舶配置与调度方案,计算新方案的碳强度见表6。由表6可知:1)折减系数升为9%时,脱硫措施、船舶碳强度、配置与调度方案均没有发生,此时碳强度约束仍被满足。2)折减系数升为11%时,中国-印度东航线上小船碳强

度变化为E级,不得不配置大船来满足碳强度约束。另外,6艘大船的碳强度变化为D级,但仍满足碳强度约束。3)随着折减系数提升至19%,所有小船均因碳强度E级而不得不配置大船,且大船碳强度也变化为D级。分析可知:折减系数增长会提高碳强度指标,需要借助减少碳排放量与提高运输功来管理碳强度。但受最小最大航速的限制,在折减系数较高时仍需要配置大容量船舶。为避免碳强度不达标与船舶满载率过低,班轮公司应该聚焦借助货运需求增加来提高运输功。

表6 不同折减系数下的船舶配置与调度方案

Tab.6 Vessel deployment and scheduling schemes under different reduction factors

折减系数	脱硫措施	碳强度	船舶配置	ECA 外平均航速/节	ECA 内平均航速/节
7%	中国-美西、中国-北欧采用脱硫塔	10艘D级、15艘C级	10艘小船、15条大船	18.8	17
9%	中国-美西、中国-北欧采用脱硫塔	10艘D级、15艘C级	10艘小船、15条大船	18.8	17
11%	中国-美西、中国-北欧采用脱硫塔	16艘D级、9艘C级	7艘小船、18条大船	19.3	17
15%	中国-美西、中国-北欧采用脱硫塔	16艘D级、9艘C级	4艘小船、21条大船	19.7	17
19%	中国-美西、中国-北欧采用脱硫塔	25艘D级	25条大船	20	17

4.5 船舶参数敏感性

为深入探究船舶参数对油耗及碳强度的影响,设置船型在5000~10000TEU、航速在13~22节范围内逐渐变化。将船舶油耗三维图绘制于图6a~6c,将船舶碳强度三维图绘制于图7a~7c。

图6分析可知:1)整体趋势上,油耗三维图向载重吨更大、航速更高的方向逐渐提升。载重吨越

大、航速越高时,船舶油耗就越大。2)图6c中航速与油耗呈非线性关系,航速越高时油耗提升幅度就越大。10000TEU船舶从15节到18节的油耗提升23吨,而从18节到21节的油耗提升30吨。3)班轮公司为降低船队油耗,满足货运需求量的前提下应减少船舶载重吨,并在调节范围内降低航速。

图7分析可知:1)整体趋势上,碳强度三维图

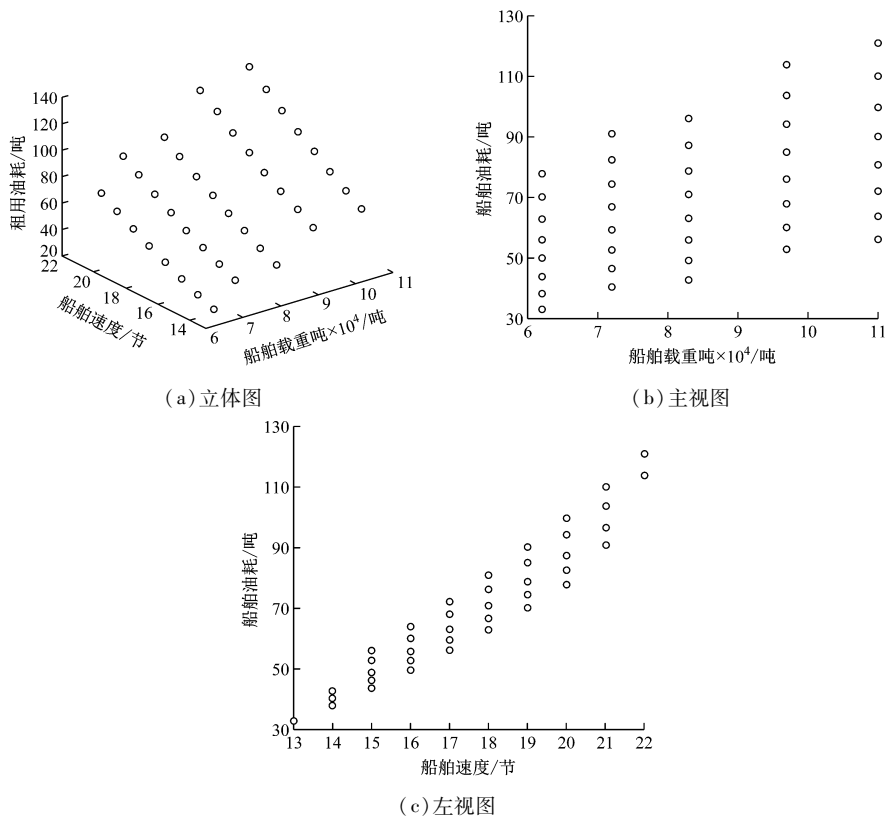


图6 船舶油耗三维图

Fig. 6 Three-dimensional plot of ship fuel consumption

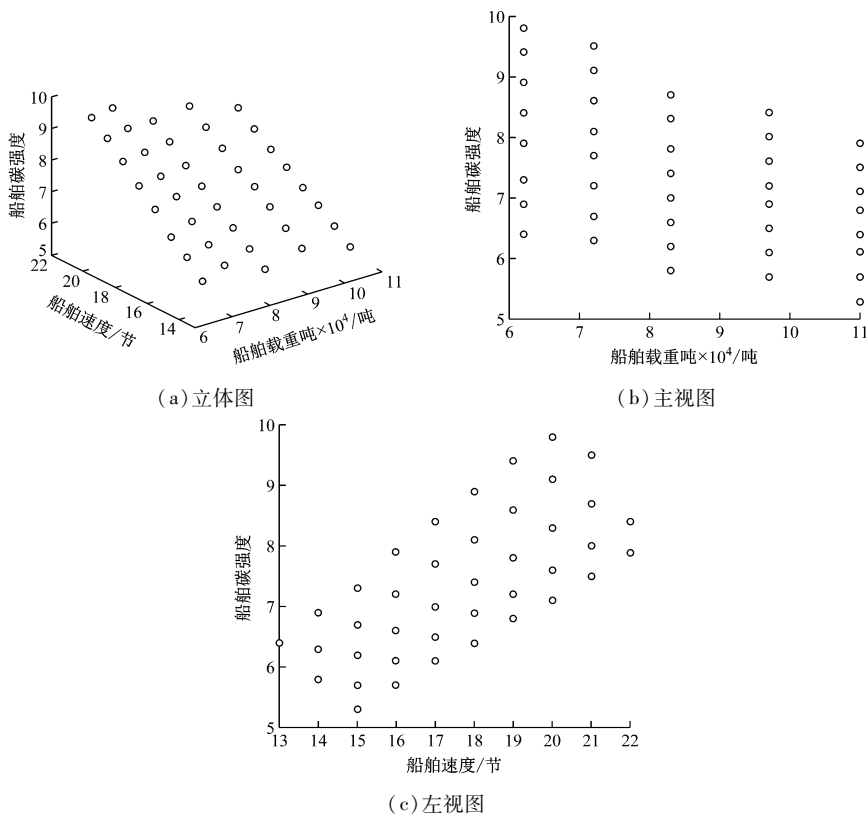


图7 船舶碳强度三维图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of ship carbon intensity

向载重吨更大、航速更低的方向逐渐降低。载重吨越大、航速越低时,船舶碳强度就越小。2) 由于油

耗三维图与碳强度三维图走势相反,说明以牺牲船舶运输功为代价来减少碳排放量,会造成船舶碳强

度指标的提高。3)班轮公司为降低船队碳强度,除了在调节范围内降低航速,还应该承揽更多货运需求来提升船舶载重吨及运输功。

5 结束语

本文兼顾碳强度管理与硫排放限制,开展脱硫措施选择以及船舶配置与调度研究。针对本文的混合整数非线性规划模型,借助线性化与 CPLEX 实现求解。以中远海运 5 条航线为背景,设计了算例试验。由于航速、配船以及碳强度约束均得到满足,模型可行性得到验证。由于不考虑碳强度约束会出现船舶碳强度不达标情况,模型有效性得到验证。开展折减系数与船舶参数的敏感性分析,为班轮公司的船队运营提供了管理启示。除了基于载重吨的营运碳强度计算方法,IMO 还提供了船舶能效营运指数、年度船舶能效比率等运营类碳强度指标,以及船舶设计能效指数、现有船舶能效指数等技术类碳强度指标,后续可以结合指标影响开展挂靠、配置及调度的集成优化研究。

参 考 文 献

- [1] Wu Y W, Huang Y D, Wang H, et al. Joint planning of fleet deployment, ship refueling, and speed optimization for dual-fuel ships considering methane slip[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10: 1690.
- [2] Hua R, Yin J B, Wang S H, et al. Speed optimization for maximizing the ship's economic benefits considering the Carbon Intensity Indicator (CII) [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 293: 116712.
- [3] Maloni M, Paul J A, Gligor D M. Slow steaming impacts on ocean carriers and shippers[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2013, 15: 151-171.
- [4] Yin J B, Fan L X, Yang Z Z, et al. Slow steaming of liner trade: its economic and environmental impacts[J]. *Maritime Policy & Management*, 2014, 41(2): 149-158.
- [5] Lee C Y, Lee H L, Zhang J H. The impact of slow ocean steaming on delivery reliability and fuel consumption [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 76: 176-190.
- [6] Qi X T, Song D P. Minimizing fuel emissions by optimizing vessel schedules in liner shipping with uncertain port times[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48: 863-880.
- [7] Wang C X, Xu C Y. Sailing speed optimization in voyage chartering ship considering different carbon emissions taxation [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 89: 108-115.
- [8] Cheaitou A, Cariou P. Greening of maritime transportation: a multi-objective optimization approach [J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 273: 501-525.
- [9] Pasha J, Dulebenets M A, Fathollahi-Fard A M. et al. An integrated optimization method for tactical-level planning in liner shipping with heterogeneous ship fleet and environmental considerations [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 48: 101299.
- [10] Xing H, Spence S, Chen H. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134, 110222.
- [11] Zhen L, Wu Y W, Wang S A, et al. Green technology adoption for fleet deployment in a shipping network[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 139: 388-410.
- [12] Zhao Y Z, Fan Y J, Fagerholt K, et al. Reducing sulfur and nitrogen emissions in shipping economically [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 90: 102641.
- [13] Wang S A, Zhu G D, Zhen L, et al. Liner shipping service planning under sulfur emission regulations [J]. *Transportation Science*, 2021, 55(2): 491-509.
- [14] Ma D F, Ma W H, Hao S F, et al. Ship's response to low-sulfur regulations: from the perspective of route, speed and refueling strategy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 155: 107140.
- [15] Lee S J, Sun Q H, Meng Q. Vessel weather routing subject to sulfur emission regulation[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 177: 103235.
- [16] Lan X G, Tao Q, Wu X C. Liner-shipping network design with emission control areas: a real case study [J]. *Sustainability*, 2023, 15: 3734.
- [17] Zhao Y Z, Zhou J M, Peng Z X, et al. Joint planning for fuel switching ships in a liner shipping network with transit time[J]. *Operational Research*, 2024, 24: 49.
- [18] Du J, Qin K X, Zhang R, et al. Multi-objective heterogeneous fleet deployment and scheduling with green technology adoption considered [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311: 118939.
- [19] Zheng J F, Hou X J, Qi J W, et al. Liner ship scheduling with time-dependent port charges [J]. *Maritime Policy & Management*, 2022, 49: 18-38.
- [20] Zhen L, Hu Y, Wang S A, et al. Fleet deployment and demand fulfilment for container shipping liners [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 120: 15-32.
- [21] Fan L X, Wang R J, Xu K. Analysis of fleet deployment in the international container shipping market using simultaneous equations modelling [J]. *Maritime Policy & Management*, 2023, 51(6): 963-980.