

引用格式:赵瑞嘉, 张晓蕾, 甘佐贤, 等. 班轮运输网络下航线配船与航速联合优化算法改进[J]. 大连海事大学学报, 2026, 52(1): 21-30.

班轮运输网络下航线配船与航速联合优化算法改进

赵瑞嘉¹, 张晓蕾¹, 甘佐贤^{*1}, 蒋美芝²

(1.大连海事大学 综合运输研究所, 辽宁 大连 116026; 2.浙江省交通运输科学研究院, 杭州 310039)

摘要:为适应航运市场变化与低碳转型发展需求, 船公司需定期进行航线配船决策优化工作。从提高船公司决策效率的目标出发, 综合考虑多条班轮运输航线的船型选择、运量分配及多种绿色航运措施等因素, 建立班轮运输网络下航线配船与航速联合优化模型。针对模型隐含的决策次序特征, 设计基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法以实现高效求解, 并通过算法对比验证了该求解方法的准确性与高效性。相较于枚举船型的算法, 该算法在获得同等优化结果的前提下, 求解效率提升约99%。最后, 以跨太平洋海域航运网络运营组织为例, 探究船队的最优经营策略。结果表明, 调整为更大载箱量的船型并适度提高航速, 能够有效提高船公司经营利润。研究成果可为船公司灵活应对市场变动、高效制定经营策略提供决策支持。

关键词:班轮运输; 航线配船; 航速优化; 决策效率

中图分类号: U692.3; F552.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7736(2026)01-0021-10

doi: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.003

Improvement of the joint optimization algorithm for ship fleet deployment and sailing speed in liner shipping networks

ZHAO Ruijia¹, ZHANG Xiaolei¹,

GAN Zuoxian^{*1}, JIANG Meizhi²

(1. *Integrated Transport Institute*, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. *Zhejiang Scientific Research Institute of Transport*, Hangzhou 310039, China)

Abstract: In response to changes in the shipping market and

the demands of low-carbon transformation, shipping companies need to regularly optimize fleet deployment decisions for their routes. To enhance the objective of decision-making efficiency of shipping companies, a joint optimization model for fleet deployment and speed in liner shipping networks was formulated, and multiple factors such as ship type selection, cargo allocation across routes, and various green shipping measures were considered. Considering the inherent sequential decision-making characteristics of this model, a two-stage interactive algorithm incorporating linear transformation and cascading increment strategies was proposed for efficient solution, and the accuracy and efficiency of this algorithm were validated through algorithm comparison and analysis. Compared to the algorithm that enumerates ship types, this algorithm improves solution efficiency by approximately 99% while achieving equivalent optimization results. Finally, taking the Trans-Pacific shipping network as a case study to investigate optimal fleet deployment strategies. Results show that utilizing ships with larger container capacity while moderately increasing sailing speeds can significantly enhance operational profitability of carriers. The research findings can provide decision support for shipping companies to flexibly respond to market changes and efficiently formulate business strategies.

Key words: liner shipping; fleet deployment; speed optimization; decision-making efficiency

0 引 言

航运业是全球供应链的核心组成部分, 承担

收稿日期: 2025-09-14; 修回日期: 2025-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72204035; 72404050; 52302387; 72574035); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(24YJC630180)

作者简介: 赵瑞嘉(1993—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: zhaoruijia@dlmu.edu.cn; 甘佐贤*(1989—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: zxgan@dlmu.edu.cn

全球近 80% 的货运量。集装箱班轮运输作为全球航运体系的关键业态,其运力随市场需求波动,通常每隔 3~6 个月就要重新进行一次航线配船决策优化工作^[1]。近年来,全球航运市场不确定性加剧,且叠加环保法规压力^[2],使得船公司在进行运营决策时,需要融合现实情境中岸电、排放控制区燃油转换等多项绿色航运措施^[3],统筹优化班轮运输网络中各航线的船型调整、运量分配、航速等。高效率制定船公司运营策略,实现航线配船与航速的联合优化,已成为其应对市场变化亟需解决的核心问题。

航线配船是船公司实现高效运营与竞争力提升的关键决策^[4]。航运市场在高位运行时,有关航线配船问题(FDP)的研究多集中于固定航速下的航次计划、运量分配等优化问题^[5]。受航运市场下行影响,各船公司纷纷通过降速策略调控航次运营成本^[6]。Zhou 等^[7]分析了燃油价格对船舶降速航行与航线运力追加之间权衡决策的影响机制。船舶的燃油消耗量与其航速的三次方呈正相关关系^[8],将航速作为变量引入航线配船问题后,该问题转化为复杂的非线性优化问题,增大了求解难度^[9]。随着绿色航运要求的不断提高,学者们开始将绿色航运策略融入航线配船与航速优化决策中:如 Wen 等^[10]在航线配船与航速优化模型中融入了排放控制区内外燃料转换措施;Shao 等^[11]分析了岸电技术对航线配船与减排效果的影响。针对该类航线配船与航速联合优化问题(FDP+SO);Wang 等^[12]通过将连续航速离散化,将其转化为 0-1 整数规划问题,从而将与航速相关的非线性约束线性化,进而可以采用线性求解器实现高效求解;Wang 等^[13]将单一航线拓展为多航线协同的班轮航运网络,构建了考虑集装箱转运与多航线联动的航线配船与航速优化问题(FDPWTR+SO),通过外逼近法将航速决策中的非线性约束线性化,进而通过线性求解器得到航线配船与航速优化方案。上述研究成果基于已知的各航线船型配置方案,而现实中运输需求存在波动性与不确定性,合理配置各航线的船型方案成为影响船公司决策的关键因素。为此,邢玉伟等^[14]在航线配船与航速优化问题中引入船型选择,构建了更为复杂的考虑多航线船型组合方案的航线配船与航速优化模型(FDPWTR+SO),在

算法设计中,枚举所有航线-船型组合情况,采用离散航速方法将与航速相关的非线性约束线性化,进而采用线性求解器求解多个已知航线-船型组合的航线配船与航速优化问题。然而,随着问题规模扩大,枚举所有可能的航线-船型组合将使计算时间显著增加,严重影响求解效率,设计高效的求解算法是亟需解决的重要问题。为此,本文研究差异性特征,采用级联递增策略缩减航线-船型组合探索的规模,以期提高求解效率。本文设计的高效求解算法的主要创新点及贡献如下:(1)融合现实情境中岸电、排放控制区燃油切换的绿色航运措施,建立班轮运输网络下航线配船与航速联合优化模型;(2)设计基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法,可显著提升船公司航线配船与航速优化方案的决策效率。研究结果可为船公司灵活应对市场变动、高效制定经营策略提供科学支持。

1 问题描述及数学模型

1.1 问题描述

本文模型涉及的变量及参数见表 1。

某船公司在 R 条航线上运营多艘集装箱船,所有航线上的挂靠港组成港口集合 \mathcal{P} 。其中,第 r 条航线上第 n 个挂靠港记为 $P_{r,n}$,船舶在第 r 条航线上依次挂靠 N_r 个港口,两个连续挂靠港 $P_{r,n}$ 与 $P_{r,n+1}$ 之间的航程为船舶在航线 r 的第 n 航段,记为 (r, n) ,这些港口与航段记为集合 $\mathcal{N}_r = \{1, 2, \dots, N_r\}$ 。航线 r 上船舶从第 1 个港口 $P_{r,1}$ 出发,航次终止于再次返回第 1 个港口 P_{r,N_r+1} ,令 $P_{r,N_r+1} = P_{r,1}$ 。在一个航次中,船舶可能多次挂靠同一港口,根据船舶在该航线中挂靠的顺序,将其标记为不同的港口^[15]。图 1 为由六条航线组成的集装箱班轮运输网络,在航线 1 上运营的船舶在一个航次中会两次挂靠上海港,分别标记为 $P_{1,4}, P_{1,9}$ 。任意两港间的集装箱运输量记为 w_{od} ,其中, $o, d \in \mathcal{P}$,分别表示集装箱运输需求的装货港与卸货港,这些需求通常可以通过某条班轮航线的运营船舶实现直达运输,有时也可以从一条航线经转运港运至另一条航线上,由多艘船舶协同完成运输,即同一运输需求存在一条或多条集装箱运输路线。

表 1 参数与变量

Tab.1 Parameters and variables

类别	标记	含义
集合	\mathcal{P}	所有船舶挂靠港的集合
	\mathcal{R}	船公司运营的航线集合
	\mathcal{K}	船公司运营的船型集合,按载箱量从小到大排序
	\mathcal{N}_r	航线 r 上挂靠港或航段组成的集合, $\mathcal{N}_r = \{1, 2, \dots, N_r\}$
	\mathcal{W}	集装箱运输的装货港 o 与卸货港 d 组成的港口对集合, $\mathcal{W} = \{(o, d)\}$
	\mathcal{H}_{od}	(o, d) 的所有集装箱运输路线 h_n^{od} 的集合, $\mathcal{H}_{od} = \{1, 2, \dots, h_n^{od}\}$
参数	P_h	集装箱运输路线 h 上单标准箱运价
	P_b, P_m, P_s	重油、轻油、岸电价格
	$L_{r,n}$	船舶在航线 r 航段 n 排放控制区外航行距离
	$q_{r,n,k}^o$	航线 r 上运营的 k 型船舶在排放控制区外航行时轻油消耗率
	$q_{r,n,k}^m, q_{r,n,k}^s$	航线 r 上运营的 k 型船舶锚地等待装卸及装卸时轻油、岸电消耗率
	$a_{r,n}$	0-1 参数,表示船舶在航线 r 港口 n 停泊时的供能方式。当使用燃油供能时, $a_{r,n} = 1$; 使用岸电供能时, $a_{r,n} = 0$
	$u_{r,n,k}$	k 型船舶在航线 r 港口 n 的装卸速度
	$g_{r,n,k}^m$	k 型船舶在航线 r 航段 n 排放控制区内航行的轻油消耗量
	$t_{r,n,k}^m$	k 型船舶在航线 r 航段 n 排放控制区内航行时间
	C_h	集装箱运输路线 h 上运输的单标准箱装卸成本
	$C_{r,k}$	k 型船舶在航线 r 上的经营成本
	$C_{r,n,k}^b$	k 型船舶在航线 r 航段 n 排放控制区外航行时的燃油成本
	$C_{r,n,k}^d$	k 型船舶在航线 r 港口 n 作业时的燃料成本
	$\alpha_{r,k}$	航线 r 上运营的 k 型船舶航行时,重油消耗量相关系数
	w_{od}	(o, d) 港口对间每周集装箱运输需求量
	$Q_{r,k}$	航线 r 上运营的 k 型船舶的最大集装箱装载量
	$\rho_{h,r,n}$	0-1 参数,表示船舶航线与集装箱运输路线的关系。当集装箱运输路线 h 包含航线 r 的航段 n 时, $\rho_{h,r,n} = 1$; 否则, $\rho_{h,r,n} = 0$
	$v_{r,n,k}^U, v_{r,n,k}^L$	k 型船舶在航线 r 航段 n 排放控制区外航行的最大、最小航速
	$t_{r,n}^L, t_{r,n}^U$	航线 r 运营船舶的最早、最晚到达 n 港时间
	决策变量	$m_{r,k}$
$x_{r,k}$		0-1 变量,表示船舶与航线的关系。 $x_{r,k} = 1$,表示 k 型船舶在 r 航线上运营; $x_{r,k} = 0$,则表示 k 型船舶不在 r 航线上运营
y_h^{od}		整数变量,集装箱运输路线 h 上装货港 o 与卸货港 d 间集装箱运输量
$v_{r,n,k}$		连续变量, k 型船舶在航线 r 航段 n 排放控制区外的航速
辅助变量	$t_{r,n,k}^a, t_{r,n,k}^d$	航线 r 上 k 型船舶到达、挂靠 n 港的时间
	$q_{r,n,k}^h$	k 型船舶在航线 r 航段 n 航行的重油消耗率,为航速的函数

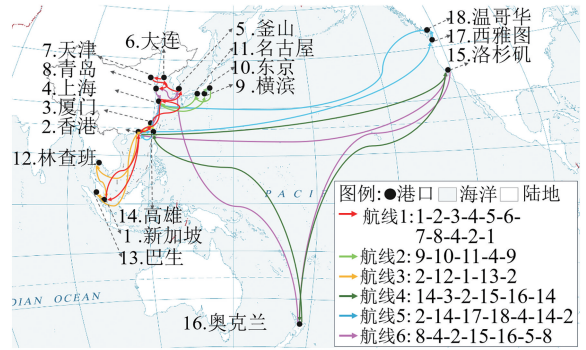


图 1 集装箱班轮运输网络

Fig. 1 Container liner shipping network

本文针对船公司多航线运营的复杂情况,在满足周班服务效率、到港时间要求及航线上集装箱运输需求的基础上,以最大化船公司运营经济性为目标,研究班轮运输网络下航线配船与航速联合优化的高效决策问题。在确保模型准确刻画核心问题的前提下,做出如下合理假设:(1) 规划期内运输需求较为稳定,不同航线上运营异质集装箱船,同一条集装箱班轮航线部署载箱量差异较小的集装箱船;(2) 基于历史数据设置各航线的航行条件及其对燃油消耗的影响因素;(3) 研究期内班轮运输网络中各航线的挂靠港顺序保持不变。

1.2 数学模型

船队运营中涉及的燃料成本包括船舶在排放控制区内、外航行时的燃油成本及船舶在港口停泊作业时的燃料成本。船舶在排放控制区内航行时仅使用轻油,其成本可表示为 $P_m g_{r,n,k}^m$; 船舶在排放控制区外航行时,船舶主机使用重油、辅机使用轻油^[10],其重油与轻油成本可表示为 $C_{r,n,k}^b$; 船舶在港口停泊作业时,根据港口是否配备岸电设施^[16],分别核算岸电使用成本或轻油消耗成本 ($C_{r,n,k}^d$)。

$$C_{r,n,k}^b = (P_b q_{r,n,k}^b + P_m q_{r,n,k}^o) L_{r,n} / v_{r,n,k}, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (1)$$

$$C_{r,n,k}^d = [a_{r,n} P_m q_{r,n,k}^m + (1 - a_{r,n}) P_s q_{r,n,k}^s] t_{r,n,k}^d, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2)$$

对于周班集装箱运输,船公司一方面可以通过调整船型实现运力优化,从而承接更多运输任务、提升收益;另一方面,也可通过调节船舶航速、优化航线配船数量及控制燃油消耗,有效降低运

输成本。本文以船队经营利润最大化为目标,综合考虑岸电使用、排放控制区燃油切换的绿色航运措施,建立班轮运输网络下航线配船与航速联合优化模型(记为 M1),具体如下:

$$[M1] \max E = \sum_{(o,d) \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} y_h^{od} (P_h - C_h) - \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{k \in \mathcal{K}} C_{r,k} m_{r,k} - \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{n \in \mathcal{N}_r} \sum_{k \in \mathcal{K}} (P_m g_{r,n,k}^m + C_{r,n,k}^b + C_{r,n,k}^d) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n \in \mathcal{N}_r} L_{r,n} / v_{r,n,k} + t_{r,n,k}^d + N_r t_{r,n,k}^m \leq 168 m_{r,k}, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (4)$$

$$\sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} y_h^{od} \leq w_{od}, \quad \forall (o,d) \in \mathcal{W} \quad (5)$$

$$\sum_{(o,d) \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} \rho_{h,r,n} y_h^{od} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} Q_{r,k} x_{r,k}, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (6)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{r,k} = 1, \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (7)$$

$$q_{r,n,k}^b = \alpha_{r,k} (v_{r,n,k}^h)^3 / 24, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (8)$$

$$t_{r,n,k}^d = \sum_{(o,d) \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} y_h^{od} \rho_{h,r,n} / u_{r,n,k}, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (9)$$

$$t_{r,n+1,k}^a \geq t_{r,n,k}^a + t_{r,n,k}^m + L_{r,n} / v_{r,n,k} + t_{r,n,k}^d, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (10)$$

$$t_{r,n}^L \leq t_{r,n,k} \leq t_{r,n}^U, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (11)$$

$$v_{r,k}^L \leq v_{r,n,k} \leq v_{r,k}^U, \quad \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r, \forall k \in \mathcal{K} \quad (12)$$

$$m_{r,k}, y_h^{od} \in Z \quad (13)$$

式(3)为目标函数,旨在最大化船公司利润,由运费收入、航次成本与经营成本构成,其中,航次成本包括集装箱装卸成本和燃料成本等,经营成本包括管理费、船员工资、船舶维护保养等支出。式(4)~式(13)为约束条件,其中,式(4)确保配船数量满足周服务频率需求;式(5)表示各 od 港口对间的所有集装箱运输路线上的运量不超过其运输需求量;式(6)为船舶容量约束,表示船舶在航线 r 第 n 航段运输的集装箱量不超过其最大载箱量;式(7)为船型约束,表示每条航线由同质船舶服务;式(8)为重油消耗率与航速的关系;式(9)表示船舶在航线 r 第 n 港的集装箱装卸

时间;式(10)为船舶连续挂靠两个港口的到港时间约束;式(11)为船舶到港时间窗约束;式(12)要求船舶在航线 r 第 n 航段的航速在其上下限范围内;式(13)为变量的整数约束。

2 基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法

M1 为非线性优化模型,其中,式(3)、式(4)、式(8)和式(10)中存在关于航速 $v_{r,n,k}$ 的高次幂项,体现了航速、航次时间、重油消耗量之间的非线性关系,导致无法直接使用线性求解器对 M1 进行求解。为此,本文在满足实际精度需求的前提下,通过航速离散化并引入 0-1 选择变量,将上述非线性约束转化为线性约束。此外,对于 M1 中的 0-1 选择变量 $x_{r,k}$,在有限的航线规模下,存在数量确定且满足约束(7)的航线-船型选择组合方案。为此,本文将模型转换为在已知各航线船型选择方案下的优化模型,以此实现对航速 $v_{r,n,k}$ 、配船数 $m_{r,k}$ 两类决策变量的降维处理。与此同时,随着航线规模的扩大,航线-船型选择组合方案数量将呈现指数爆炸的变化趋势,对每一种组合方案逐个求解耗时巨大。为此,本文设计了级联递增策略,从最小船型的组合方案出发,基于正利润指标对各航线选配船型级联递增,以实现快速求解。综上,本文设计了基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法,求解流程如图 2 所示。算法中涉及的参数与变量见表 2。

Line Procedures	
1	Begin
2	Input parameters
3	M1 → Ship Selection Model (M2) and FDP+SO Model (M3)
4	Discrete speeds and transforms M3 into a linear model M4
5	Create an initial combination $O = \{1, 1, \dots, 1\}$
6	Call CPLEX to solve M4 with the given O , and obtain $E(O)$
7	Loop
8	Update O to \tilde{O} based on cascading incremental strategy
9	Call CPLEX to solve M4 with given \tilde{O} , and obtain $E(\tilde{O})$
10	If $E(\tilde{O}) > E(O)$
11	Let $O \leftarrow \tilde{O}$, and $E(O) \leftarrow E(\tilde{O})$
12	else
13	Break
14	End if
15	End loop
16	Output the result O and $E(O)$ of M1
17	End

图 2 求解算法流程

Fig.2 Flowchart of the solving algorithm

表 2 算法中涉及的参数与变量

Tab.2 Parameters and variables in the algorithm

类别	标记	含义
集合	S	离散航速的集合, $S = \{1, 2, \dots, S+1\}$
参数	O	航线-船型组合方案
	$v_{r,n}^s$	船舶在航线 r 航段 n 上第 s 个航速值
	v_r^U, v_r^L	在航线 r 上运营船舶的最大、最小航速
	Q_r	在航线 r 上运营船舶的最大载箱量
	$u_{r,n}$	k 型船舶在航线 r 港口 n 的装卸速度
决策变量	$\beta_{r,n}^s$	0-1 变量, 表示航速与航线的匹配关系。 $\beta_{r,n}^s = 1$, 表示船舶在航线 r 航段 n 以第 s 个航速运营; $\beta_{r,n}^s = 0$, 则表示船舶在航线 r 航段 n 未选择第 s 个航速
	m_r	整数变量, 在航线 r 上运营的船舶数量
辅助变量	$v_{r,n}$	船舶在航线 r 航段 n 排放控制区外的航速

2.1 模型分解

根据 M1 中决策变量间的关联关系与次序, 在确定船型与航线组合关系的前提下, 可以对其余决策变量进行降维处理, 由此可将 M1 分解为船型优选模型 M2 及已知船型方案下的航线配船与航速联合优化模型 M3。其中, M2 的决策变量为 $x_{r,k}$; M3 的决策变量为在已知 $x_{r,k}$ 下的 $m_r, y_h^{od}, v_{r,n}$ 。

$$[M2] \quad \max E(x_{r,k}) \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{式(7)}$$

$$[M3] \quad \max E(m_r, y_h^{od}, v_{r,n} \mid x_{r,k}^*) \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n \in \mathcal{N}_r} L_{r,n} / v_{r,n} + t_{r,n}^d + N_r t_{r,n}^m \leq 168m_r, \forall r \in \mathcal{R} \quad (16)$$

$$\sum_{(o,d) \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} \rho_{h,r,n} y_h^{od} \leq Q_r, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (17)$$

$$q_{r,n}^b = \alpha_r (v_{r,n}^h)^3 / 24, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (18)$$

$$t_{r,n}^d = \sum_{(o,d) \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} y_h^{od} \rho_{h,r,n} / u_{r,n}, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (19)$$

$$t_{r,n+1}^a \geq t_{r,n}^a + t_{r,n}^m + L_{r,n} / v_{r,n} + t_{r,n}^d, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (20)$$

$$t_{r,n}^L \leq t_{r,n} \leq t_{r,n}^U, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (21)$$

$$v_r^L \leq v_{r,n} \leq v_r^U, \forall r \in \mathcal{R} \quad (22)$$

$$m_r, y_h^{od} \in Z \quad (23)$$

$$\text{式(5)}$$

2.2 线性转换

航速 $v_{r,n}$ 的高次幂项是影响 M3 求解效率的关键因素之一。为此, 引入 0-1 变量刻画航速^[12],

将航速在其取值范围 $[v_r^L, v_r^U]$ 内按固定间隔离散为 $(S+1)$ 个航速, 离散后第 s 个航速计算式为:

$$v_{r,n}^s = v_r^L + (s-1)(v_r^U - v_r^L) / S, \forall s \in S \quad (24)$$

引入新变量 $\beta_{r,n}^s$, 决策变量航速 $v_{r,n}$ 表示为:

$$v_{r,n} = \sum_{s \in S} \beta_{r,n}^s v_{r,n}^s, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (25)$$

基于新变量 $\beta_{r,n}^s$ 对非线性约束 (1)、(16)、(18)、(20) 进行线性变换, 得到对应的线性约束如下。

$$C_{r,n}^b = \sum_{s \in S} \beta_{r,n}^s (P_b q_{r,n}^b + P_m q_r^0) L_{r,n} / v_{r,n}^s, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (26)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}_r} \sum_{s \in S} \beta_{r,n}^s L_{r,n} / v_{r,n}^s + e_{r,n} Y_{r,n} + N_r t_{r,n}^m \leq 168m_r, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (27)$$

$$q_{r,n}^b = \alpha_r \sum_{s \in S} \beta_{r,n}^s (v_{r,n}^s)^3 / 24, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (28)$$

$$t_{r,n+1}^a \geq t_{r,n}^a + t_{r,n}^d + \sum_{s \in S} \beta_{r,n}^s L_{r,n} / v_{r,n}^s + t_{r,n}^m, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (29)$$

将 M3 转换为已知航线-船型选择组合方案下的线性优化模型 M4, 具体表示如下:

$$[M4] \quad \max E(m_r, y_h^{od}, v_{r,n,k} \mid x_{r,k}^*) \quad (30)$$

$$v_r^L \leq \sum_{s \in S} \beta_{r,n}^s v_{r,n}^s \leq v_r^U, \forall r \in \mathcal{R}, \forall n \in \mathcal{N}_r \quad (31)$$

$$\text{式(5)、式(16)—(21)、式(23)、式(26)—(29)}$$

2.3 级联递增策略

为避免由于班轮运输网络规模扩大可能导致的航线-船型组合方案数量激增、求解时间复杂度高的问题, 本文设计级联递增策略搜索最优的航线-船型组合方案, 其求解流程如下。

Step 1: 输入参数, 包括航线数 R 、船型数 K , 以及各船型船舶的载箱量、航速限制、燃料消耗率、装卸效率等信息。

Step 2: 确定航线-船型的初始组合方案 $O = \{1, 1, \dots, 1\}$, 采用线性求解器求解 M4, 得到当前组合方案 O 的利润 $E(O)$ 及各运输需求完成量。

Step 3: 基于组合方案 O 下的优化结果, 计算各运输需求对应的剩余集装箱运输量 \tilde{w}_{od} , 并将其平均分配至可行的集装箱运输路线上。

$$\tilde{w}_{od} = w_{od} - \sum_{h \in \mathcal{H}_{od}} y_h^{od} \quad (32)$$

在此基础上, 根据班轮航线与集装箱运输路

线的对应关系 $\rho_{h,r,n}$, 将 $\tilde{w}_{od} / |\mathcal{H}_{od}|$ 对应至各航线的航段上。该步骤采用将剩余运量平均分配至各可行路径的启发式规则, 可为后续船型调整提供一种快速、无偏的收益潜力评估基准, 保证级联策略的迭代效率。在缺乏先验信息的情况下, 平均分配可避免对特定路径的偏好, 确保所有备选航线在运力提升评估中的公平性。

Step 4: 选择组合方案 O 中第 1 条航线上部署的船型, 根据船型集合 \mathcal{K} 中的顺序, 将其调整为相邻更高载箱量的船型, 计算调整后的成本增量及由运量增加带来的收益增量。依次遍历组合方案 O 中的各条航线并独立执行上述操作, 得到每个船型调整后对应的利润增量, 最终确定利润增量最大的船型调整方案及对应的组合方案 \tilde{O} 。

Step 5: 调用线性求解器求解组合方案 \tilde{O} 下的利润 $E(\tilde{O})$ 。若 $E(\tilde{O}) - E(O) > 0$, 更新组合方案 $O \leftarrow \tilde{O}, E(O) \leftarrow E(\tilde{O})$, 转 Step 3; 否则转 Step 6。

Step 6: 输出航线-船型组合方案 O 、配船数量、航速、运量等决策变量, 以及对应的利润目标值 $E(O)$, 结束。

3 案例分析

3.1 基础数据

本文以某集装箱班轮公司在亚洲-北美洲-大洋洲的跨区域航运网络运营实践为例进行分析。该航运网络由 6 条航线组成, 挂靠新加坡港、香港港、温哥华港等共 18 个港口, 如图 1 所示。航线中各航段距离可从 00cha.net 网站获得。根据统计资料评估各港口对间的运输需求情况, 具体如图 3 所示。

为保证各航线周班服务的稳定性, 公司需为每条航线合理配置集装箱船, 船型相关数据^[13]见表 3。国际海事组织在《防止船舶污染国际公约》中划定了硫排放控制区, 船舶在该区域内航行时所使用的燃油与远洋航行时有所不同, 必须符合更严格的硫含量限制。为衡量排放控制区内外的船舶燃油成本差异, 根据不同国家设置的排放控制区范围, 选取船舶在排放控制区内航行时长为 1 h~15 h。通过市场调研获取轻油与重油的价格分别为 612 美元/t、510 美元/t。船舶挂靠港口时, 船型尺寸会对装卸作业可配置的岸桥数量形

成约束, 因此, 船舶在各港的装卸效率会因船型不同而有所差异。同时, 船舶在各港装卸量的差异也将导致在港时间的差异, 进而影响船舶在港成本。船舶在各港口的装卸成本均为 60 美元/TEU、转运成本均为 100 美元/TEU^[13]。船舶靠泊作业期间使用岸电的电价为 0.22 美元/(kW·h)。

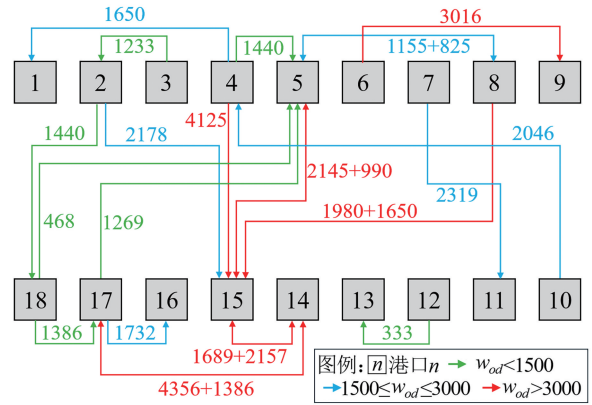


图 3 港口间的集装箱运输需求信息

Fig.3 Information on container transportation demand between ports

表 3 船型相关参数

Tab.3 Ship-type related parameters

船型	最大载箱量 /TEU	装卸效率 /(TEU·h ⁻¹)	经营成本 /10 ⁴ 美元	轻油消耗速 率/(t·h ⁻¹)	岸电效率 /kW
1	3000	170	7.69	0.13	558
2	5000	190	11.54	0.21	918
3	10 000	240	17.31	0.50	2336

3.2 算法验证与对比

为验证本文设计的基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法求解 M1 的准确性与效率, 设置如下两类算法进行对比分析。

(1) 逆序递推下的优化结果对比

以 $O = \{3, 3, 3, 3, 3, 3\}$ 作为航线-船型的初始组合方案, 按照船型集合 \mathcal{K} 中的次序, 逆序调整船型, 将每条航线上的船型调整至较相邻更低载箱量的船型。采用基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法, 探索航线-船型的最优组合方案, 依次执行图 4 蓝色箭头的船型调整步骤, 最终得到最优组合方案为 $O = \{2, 1, 1, 3, 3, 1\}$ 。图 4 中红色箭头为顺序递推策略下的船型调整步骤。由图 4 可知, 逆序递推过程与顺序递推过程均得出了完全一致的结果, 表明本文设计的基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法从两个方

向均能探索到一致的最优解。

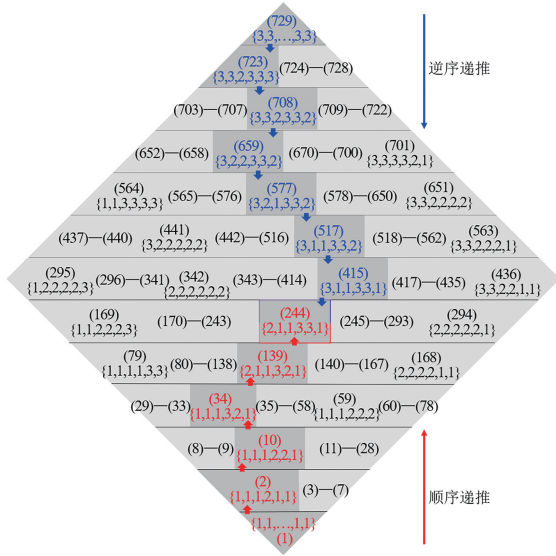


图 4 采用级联递增策略求解 M1 的顺序与逆序递推
Fig.4 Forward and backward recursion for solving M1 by using the cascading incremental strategy

(2) 求解精度与求解效率对比

为检验基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法在求解 M1 优化问题时的求解精度与效率,将该方法与其他三种求解算法(算法 1、2、3)进行对比。其中,算法 1 求解 M1 时,枚举所有可能的航线-船型组合方案^[14],调用 SCIP 求解器直接求解非线性模型,选择利润最大的组合作为最优解;算法 2 是在枚举所有可能的航线-船型组合方案下,通过离散航速,将 M1 转化为多个已知航线-船型组合方案下的线性优化模型 M4,最终在每个固定组合下调用 SCIP 求解,选择利润最大的组合作为最优解;算法 3 是在算法 2 的基础上,将 SCIP 求解器替换为 CPLEX 求解器。四种求解方法的特征及其优化结果、求解效率如表 4 所示。

表 4 四种求解方法优化结果的精度与求解效率对比

Tab.4 Comparison of accuracy and solving efficiency for optimization results among four solving methods

算法	策略	模型类型	求解器	航线-船型组合方案	利润/万美元	求解时间/s
算法 1	枚举所有组合	非线性	SCIP	{2,1,1,3,3,1}	1529	38285
算法 2	枚举所有组合	线性	SCIP	{2,1,1,3,3,1}	1514	24349
算法 3	枚举所有组合	线性	CPLEX	{2,1,1,3,3,1}	1514	5760
本文算法	级联递增	线性	CPLEX	{2,1,1,3,3,1}	1514	48

表 4 中,对比算法 1 与算法 2 可知,采用 SCIP 求解器求解非线性模型得到利润的优化结果为 1529 万美元,而采用 SCIP 求解线性模型的优化结果为 1514 万美元,算法 2 在目标函数上降低 0.9%,但可以节省约 36%的计算时间。两个算法的差异在于算法 1 中航速的精确度更高,在运营成本、装卸成本均基本不变情况下,使得燃油成本增加 15 万美元。考虑现实情境中 0.1 kn 的航速精度已能满足航行需求,更高的航速精度易增加船员操作难度,因此,可以认为本文设计的线性化方法在精度允许的情况下适用于求解 M2。对比算法 2 与算法 3 可以发现,相对 SCIP 求解器,采用 CPLEX 求解能够获得相同的优化结果,且求解效率提高约 76%。对比本文算法与算法 3 可知,两种算法均能获得相同的优化结果,但本文算法的求解效率较算法 3 提升了 99%,这表明本文设计的方法在优化结果质量与求解效率方面均具

有明显优势。

3.3 优化结果与分析

以组合方案 $O = \{1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ 作为各航线船型的初始方案,在 MATLAB R2021a 上进行编程,通过 Yalmip 工具箱调用 CPLEX 求解器对已知航线-船型组合方案为 O 的优化模型 M4 求解,得到该方案的利润 $E(O)$ 为 893 万美元。在此基础上,采用级联递增策略进行寻优,具体过程如图 5 所示。

通过式 (32) 计算已知航线-船型组合方案为 O 的各运输需求剩余值,如厦门港-香港港口对间剩余集装箱运输需求量为 1233 TEU。选择组合方案 O 中第 1 条航线上部署的船型,根据船型集合 K 中的顺序,将其调整至相邻更高载箱量的船型 2,记录为 $[1, 1, 2]$,其中,数字含义分别为第 1 次调整、第 1 条航线、调整为船型 2,计算由船型调整导致的成本增量,以及运力增加对应的收益

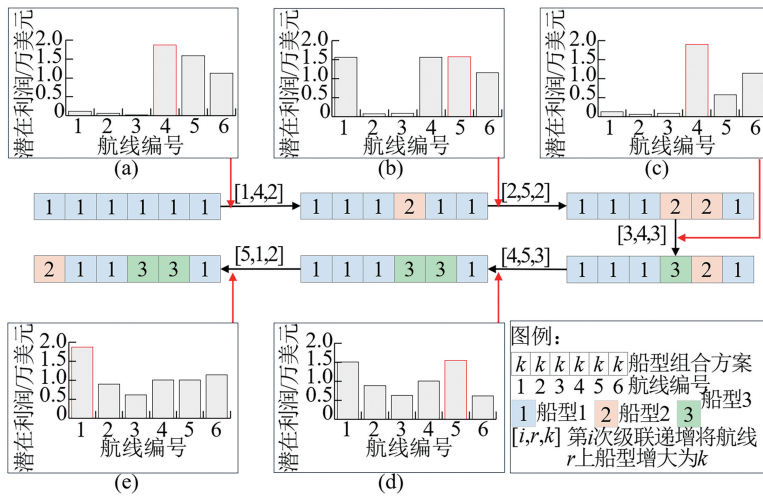


图 5 采用级联递增策略求解 M2

Fig.5 Solution approach for M2 by using the cascading incremental strategy

增量,计算出 $[1,1,2]$ 对应的利润增量。依次遍历组合方案 O 中的每一条航线,均单独执行上述操作,得到每条航线船型调整对应的利润增量,如图 5(a) 所示。选择将第 4 条航线的船型 1 调整为船型 2 时,能够获得的利润增量最大,为 186 万美元。因此,按 $[1,4,2]$ 调整方案更新航线-船型组合方案,令 $\tilde{O} = \{1,1,1,2,1,1\}$,调用 CPLEX 求解组合方案 \tilde{O} 下的利润 $E(\tilde{O})$ 为 1080 万美元。重复上述操作,依次将第 5 条航线的船型调整为船型 2,第 4 条航线的船型调整为船型 3,第 5 条航线的船型调整为船型 3,第 1 条航线的船型调整为船型 2,如图 5 (b) ~ (e) 所示。此时,再对任意航线进行船型调整,均无法实现船公司利润的进一步增长。最终,得到最优航线-船型组合方案为 $\tilde{O} = \{2,1,1,3,3,1\}$,对应的利润目标值 $E(\tilde{O}) = 1514$ 万美元。

为深入探究级联递增策略对船公司运营策略的影响,对航线-船型组合方案下船队的平均航速、在港时间与集装箱运量进行分析,结果如图 6 所示,其中,横坐标 1-6 分别对应图 5 中 6 个不同阶段的航线-船型组合方案。

由图 6 可知,随着航线上部署的船型增大,船队平均航速从 18.9 kn 提高至 23.2 kn,在满足到港时间约束、周班服务频率约束的前提下,船队运量提高了 1.2 万 TEU,在港口停靠时间从 0.85 天增加至 1.40 天。该过程的各项成本与收入变化详见表 5。由表 5 可知,虽然燃油、装卸、经营成

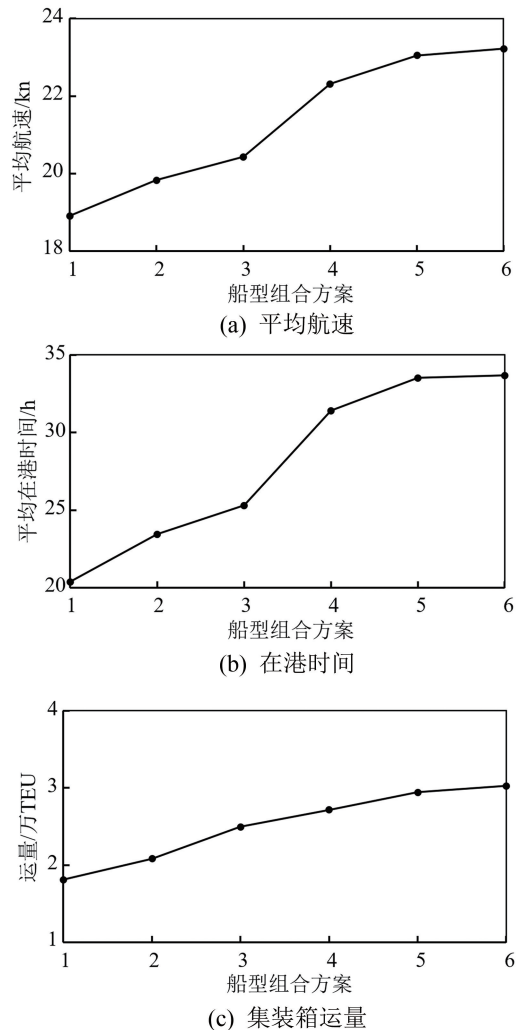


图 6 不同航线-船型组合方案下的船队经营策略对比

Fig.6 Comparison of fleet operation strategies under different route-ship type combinations

本增加了 665 万美元,但船公司获得 1286 万美元的收入,相较航线-船型初始组合方案 1,最优组合方案 6 的利润增加了 41%。由此可见,随着航

线上船型的大型化,船队可通过提高航速缩短航行时间,增加船队在港时间,以实现更多的装卸任务,进而获得更大的经营利润。

表 5 航线-船型组合方案变化时的收入与成本变化

Tab.5 Revenue and cost variations under route-ship combinations

过程	收入/万美元	燃油成本/万美元	装卸成本/万美元	经营成本/万美元	总成本/万美元	利润/万美元
(a)	1851	496	277	185	958	893
(b)	2154	548	322	204	1074	1080
(c)	2431	587	383	223	1193	1238
(d)	2865	720	465	252	1437	1428
(e)	3137	817	510	296	1623	1514

4 结 论

为提高船公司应对航运市场变化及低碳转型需求的决策效率,本文融合现实情境中岸电、排放控制区燃油转换的绿色航运措施,建立了班轮运输网络下航线配船与航速联合优化模型,设计了基于线性转换与级联递增策略的两阶段交互算法实现求解,并以跨太平洋海域的航运网络运营组织案例为例进行验证,得到的主要结论如下。

(1)对跨太平洋海域的航运网络运营组织案例的分析结果表明,本文构建的联合优化模型与求解方法能够快速准确获得船公司的最优运营策略,且在运量需求旺盛情况下,部署更大载箱量的船型、提高航速,可有效提升船公司经营利润。

(2)算法对比结果表明,级联递增策略能够从顺序递推与逆序递推双向探索到一致的最优航线-船型组合方案。相比现有文献求解方法,本文设计的求解方法可将求解时间缩短 99%,显著提升了船公司的决策效率。本文的研究成果有利于船公司灵活应对市场变动,为其高效制定经营策略提供了理论支撑。

参考文献 (References):

[1] DULEBENETS M A, PASHA J, ABIOYE O F, et al. Vessel scheduling in liner shipping: a critical literature review and future research needs[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2021, 33: 43-106.

[2] 孙薇薇, 梁承姬, 石健, 等. 航运联盟背景下船舶绿色燃料改造问题[J]. 大连海事大学学报, 2024, 50(2): 159-167.

SUN W W, LIANG C J, SHI J, et al. Green fuel retrofit strategies for vessels in the shipping alliance context[J].

Journal of Dalian Maritime University, 2024, 50(2): 159-167. (in Chinese)

[3] TADROS M, VENTURA M, SOARES C G. Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114670.

[4] WANG X Y, JIN C, ZHENG H, et al. A two-phase optimization model for low-sulphur operation of container liners in the context of carbon neutrality[J]. Ocean Engineering, 2023, 286: 115669.

[5] 韩颖, 赵瑞嘉, 金培宇, 等. 大宗工业物资运输运力配置优化方法的改进[J]. 中国管理科学, 2024, 32(6): 79-85.

HAN Y, ZHAO R J, JIN P Y, et al. Improvement of the optimization method for the capacity allocation of bulk industrial materials transportation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(6): 79-85. (in Chinese)

[6] XING Y W, WU Z R, YANG H L, et al. Optimization of container ship sailing speed considering carbon emissions policies and cargo time value[J]. Engineering Optimization, 2025, 57(12): 3839-3862. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2025.2456593>.

[7] ZHOU Y, WANG C X. Decisions on ship route, refueling, and sailing speed considering ECA regulation and demand uncertainty[J]. Journal of the Operational Research Society, 2025, 76(1): 14-33.

[8] 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(3): 49.

[9] 李德昌, 杨华龙, 宋巍, 等. 考虑排放控制区和多时间窗的班轮运输加油与货运收益优化[J]. 运筹与管理, 2023, 32(4): 78-85.

- LI D C, YANG H L, SONG W, et al. Refueling and freight revenue optimization of liner shipping considering emission control area and multi-time windows[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(4): 78-85.(in Chinese)
- [10] WEN X, CHEN Q, YIN Y Q, et al. Green vessel scheduling with weather impact and emission control area consideration [J]. *Mathematics*, 2023, 11(24): 4874.
- [11] SHAO S, XU M, TAN Z J, et al. Ship deployment problem with green technology adoption for an inland river carrier under non-identical streamflow and speed limits[J]. *Transport Policy*, 2024, 157: 46-56.
- [12] WANG H Q, LIU Y, LI F, et al. Sustainable maritime transportation operations with emission trading[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(9): 1647.
- [13] WANG S A, MENG Q. Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(3): 701-714.
- [14] 邢玉伟, 杨华龙, 郑建风, 等. 考虑货物时间价值的洲际班轮航线配船与航速优化[J]. *系统工程学报*, 2022, 37(6): 796-810.
- XING Y W, YANG H L, ZHENG J F, et al. Optimization of fleet deployment and vessel sailing speed for intercontinental liner considering cargo time value [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(6): 796-810.(in Chinese)
- [15] ZHENG J F, MA Y Q, JI X, et al. Is the weekly service frequency constraint tight when optimizing ship speeds and fleet size for a liner shipping service? [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 212: 105815.
- [16] 彭云, 李相达, 王文渊, 等. 绿色集装箱港口节能减排策略综述[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(4): 28-46.
- PENG Y, LI X D, WANG W Y, et al. Review on energy saving and emission reduction strategies of green container ports [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(4): 28-46.(in Chinese)