

文章编号:1000-4653(2025)02-0172-09

考虑 CII 等级约束和生物燃料使用的 船队布局优化研究

张焱飞^{1,2}, 刘璐^{1,2}, 李荣贵³, 冯亮^{1,2}

- 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;
- 上海船舶运输科学研究所有限公司 航运技术交通行业重点实验室, 上海 200135;
- 中远海运集装箱运输有限公司, 上海 200080)

摘要:随着 2023 年船舶营运碳强度指标 (CII) 的生效, 航运公司因日益严格的要求面临经营压力。本文提出面向 CII 法规约束的船队优化方法, 以某班轮公司 8 500 TEU 系列船在 5 条航线的排班为研究对象, 考虑船队中主机油耗性能差异, 对“考虑单船 CII 等级限制的船队排班”和“以单船无 E 级船舶和生物燃油最少限度使用的船队排班”两个场景进行优化。研究表明, 本文提出的优化算法对比随机排班能够保持船队 CII 合规以及降低生物燃料的使用量。该研究有助于解决航运企业满足船队 CII 等级履约以及减少碳排放的实际需求, 后续能够进一步提升航运公司对国际绿色低碳法规的应对能力。

关键词: CII 法规; 生物燃油; 船队布局优化; 班轮公司

中图分类号: U695.2+2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.022

Studies on fleet deployment optimization considering CII class constraints and biofuels

ZHANG Yanfei^{1,2}, LIU Lu^{1,2}, LI Ronggui³, FENG Liang^{1,2}

- State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200135, China;
- Key Laboratory of Marine Technology Ministry of Communications, PRC, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200135, China;
- COSCO SHIPPING Lines Co., Ltd, Shanghai 200080, China)

Abstract: As the CII regulations took effect in 2023, shipping companies are under increasing pressure to comply with these stringent regulations. This paper presents a fleet optimization method for CII regulatory constraints, considering the difference in main engine fuel consumption performance within the fleet. Two scenarios are optimized: "Fleet scheduling considering single ship CII rating limits" and "Fleet scheduling with no E-class ships and the least used biofuel". The results demonstrate that the proposed optimization algorithm outperforms random scheduling in maintaining fleet CII compliance and reducing biofuel usage. This study will help shipping companies meet fleet CII regulations and reduce carbon emissions, while improving their ability to respond to international green and low-carbon regulations.

Key words: CII regulations; biofuel; fleet deployment optimization; liner company

船舶营运碳强度指标 (Carbon Intensity Indicator, CII) 是用来衡量船舶每单位运输工作的碳排放量, 其单位用克/吨海里表示^[1], 表现了船舶实际的

营运能效水平。从 2023 年 1 月 1 日起, CII 对 5000 总吨及以上的国际航行船舶强制生效。根据 CII 法规, 国际航行船舶从优秀至不合格依次划分了 A、B、

收稿日期: 2024-06-01

作者简介: 张焱飞 (1994—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为船舶节能减排。E-mail: zhang.yanfei@coscoshipping.com

引用格式: 张焱飞, 刘璐, 李荣贵, 等. 考虑 CII 等级约束和生物燃料使用的船队布局优化研究 [J]. 中国航海, 2025, 48(2): 172-180.

ZHANG Y F, LIU L, LI R G, et al. Studies on fleet deployment optimization considering CII class constraints and biofuels [J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 172-180. (in Chinese)

C、D、E 五个等级,评级为 E 或连续三年评级为 D 的船舶需要在船舶能效管理计划中制定纠正措施^[2]。2024 年 6 月 1 日及以后船舶将带着能效标签,评级为 E 或连续 3 年评级为 D 的船舶,在 PSC 检查时,将会受到更多关注,增加滞留风险^[3]。同时,面对越来越严格的 CII 法规要求和限制,航运公司为了保证 CII 等级合规需要付出更多的经济成本^[4]。为此亟须开展对船舶营运能效指标 CII 相关运营支撑技术研究,通过跟踪相关法规变化,采取有效措施降低碳排放和提升船舶能效,从而减少绿色低碳法规对航运公司的影响。

目前,国内外众多学者就 CII 法规应对问题开展了多项研究,包括 CII 的影响因素分析^[5-6],技术与营运措施^[7-8]等方面。其中,船队布局优化是公司在排放控制政策下的重要战略决策。KSCIUK 等人回顾了船舶路径优化以及排班优化的几类问题,研究发现当前主流文献中考虑了航行时间、装卸货时间、货物需求、燃油价格等主要输入因素,但是随着 CII 法规的生效,如何针对 CII 法规进行优化提出了更大的挑战^[9]。WANG 等^[10]考虑了船舶油耗性能之间的差异,建立了一种混合整数规划模型,选择最优的船舶,从而得到成本最少的船队布局方案。钟铭等^[11]针对碳减排政策的要求,构建一种非线性规划模型,研究了不同碳政策下的班轮公司船队分配和航速优化方案。

随着 CII 评级阈值将变得越来越严格,许多船舶将不满足评级要求,同时接连出台的绿色低碳法规如 EU-ETS 等碳排放缴纳机制将会给航运公司带来巨大的运营成本,因此,研究减排背景下航运系统的船队运营优化,在发展绿色航运的同时控制运营成本,具有重要的理论和现实意义。对于使用传统燃料的船队而言,为降低碳排放,提升 CII 等级或者船舶的营运表现,船队运营管理者在制定船队航线布局方案时可采取两个方面的措施:

- 1) 优化船队航线排班布局,保障船队的合理使用,从而实现船队 CII 评级达标的整体目标;
- 2) 使用可替代减碳燃料,生物燃料凭借其显著的碳减排潜力^[12-13]、良好的燃烧特性和排放性能^[14],是目前可以替代传统燃料的合适选择之一。

因此本文针对 CII 法规等级要求,从班轮公司角度出发,在给定航线网络情况下,考虑船队各船之间的油耗性能差异,对船队在营运过程中船队的最佳 CII 等级和最低限度的生物燃料使用两个应用场景进行研究,构建不同场景下的整数规划模型,实现符合优化要求的最佳布局,为船舶运营商提供决策

优化方案。

1 问题描述

1.1 场景一:考虑单船 CII 等级限制的船队整体优化

一个集装箱船队通常由多条船舶组成,每艘船舶的 CII 等级也不尽相同,船队每艘船舶的 CII 评级将会影响未来船队需承担的履约责任,因此,如何通过船舶航线配船保证船队整体 CII 最优是需要解决的问题。对于性能较差的船舶,可以配置在海况较好、航速较低的航线上。因此,考虑单船的航行性能和单船 CII 等级要求限制,以船队 CII 整体 E 等级最少为目标进行船队整体规划,以保证船队 CII 等级最优。

1.2 场景二:以单年无 E 级船为目标的生物燃油使用最少优化

场景一将船舶航行油耗性能较好的船投放到航速较高的航线,航行油耗性能较差的船安排到航速较低的航线,保障船队的合理使用,从而实现船队整体 CII 评级最优,但不能保证每艘船舶都一定在 E 级以上。为了保证每艘船舶 CII 等级要求,采取提升船舶能效措施来使 CII 等级满足评级要求。生物燃料是可再生能源,其燃烧过程产生的二氧化碳相当于植物在生长过程中吸收的二氧化碳量,因此对减少温室气体排放具有积极作用^[12]。因此考虑使用生物燃料来降低船舶 CII 等级。同时,考虑到生物燃料的价格因素,如何保证生物燃油成本最低是需要解决的问题。对于场景二而言,各艘单船需要满足达到的 CII 等级要求的同时也要保证没有 E 级船舶的出现,每一艘船舶仅可以被安排在唯一的一条航线。

2 模型构建

本研究采用静态研究方法,默认规划期内的参数为固定值,如航线的气象和海况、燃油变化以及船舶航行油耗性能等。因此,为了构建优化模型,在进行优化之前,我们作出以下假设:

- 1) 假设班轮公司拥有的船舶数量已确定,不考虑船舶租赁和转运;
- 2) 场景 1 和场景 2 中分配在各航线的船舶数量是固定的,不发生变化;
- 3) 航线上分配的船舶在计划期内重复航行;
- 4) 在场景 1 当中,船舶主机、辅机使用的燃油类型统一使用重油,对应碳系数为 3.114;
- 5) 在场景 2 当中,船舶主机、辅机使用的燃油

类型统一使用 B24 生物柴油, 对应碳系数约为 2.65;

6) 优化中不考虑航线的气象和海况变化引起的船舶航行油耗变化;

7) CII 计算公式中的油耗仅考虑航行过程中的主机和辅机油耗, 船舶在靠港期间发生的油耗以及锅炉或其他主要燃油设备的油耗不在总油耗之内;

8) 不考虑生物柴油与重油之间的燃烧热值之间的差异。

针对两个优化场景设计如下参数和变量(见表1)。

表1 优化场景的参数与决策变量定义

Tab.1 Definition of Parameters and Decision Variables for optimization scenarios

类型	符号	定义
	$R = \{1, \dots, r\}, r \in R$	航线集合
	$V = \{1, \dots, v\}, v \in V$	船舶集合
	$S = \{s_1, n_1, \dots, s_r, n_r\}$	航线 r 上分配的船舶数量集合
	$L_r = \{1, \dots, n\}, i \in L_r$	航线 r 上航段 i 的集合
	p_v	船 v 与基线的性能差异百分比/%
	V_{gri}	航线 r 上航段 i 的计划航速/kn
	t_{ri}	航线 r 上航段 i 的计划航行时间/h
参数	C_v	船 v 的载重吨/t
	C_f	重油的碳系数
	B_f	生物燃油的碳系数
	q_a	船舶辅机日燃油消耗量/(t/d)
	T_v	船 v 的 CII 等级目标值
	$M_{r,v}$	船 v 在航线 r 的主机油耗/t
	$A_{r,v}$	船 v 在航线 r 的辅机油耗/t
	$\alpha_{v,r}$	船 v 在航线 r 上的 CII 值
	$I_{v,r}$	船 v 在航线 r 上的评级
	$B_{v,r}$	船 v 在航线 r 上所需的生物燃油量/t
决策变量	$x_{v,r} \in (0, 1), \forall r \in R$	如果船 v 分配给航线 r 取 1;
变量	$\forall v \in V$	否则取 0

2.1 场景一模型构建

2.1.1 参数之间关系

参数之间的关系:

$$M_{r,v} = \sum_{i=1}^n (1 + p_v) f(V_{gri}) \times t_{ri} / 24 \quad (1)$$

$$f(V_{gri}) = \beta_0 + \beta_1 V_{gri} + \beta_2 V_{gri}^2 + \beta_3 V_{gri}^3 \quad (2)$$

$$A_{r,v} = q_a \times \sum_{i=1}^n t_{ri} / 24 \quad (3)$$

式(1)中: $(1 + p_v) f(V_{gri})$ 为船 v 在航速为 V_{gri} 时的主机日耗油量, t/d; $f(V_{gri})$ 为船 v 主机日耗油量与航速的关系。

根据已有研究, 船舶航速与船舶油耗呈三次方关系, 因此本文用三次幂函数建立两者之间的关系, 用式(2)表示, 其中 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为实船航速与日燃油消耗的拟合系数。

船 v 在航线 r 上的 CII 值可以表示为式(4)和(5), 式(5)中 z 为年度折减系数, a 和 c 为 CII 法规计算参数:

$$\alpha_{v,r} = \frac{(M_{r,v} + A_{r,v}) \times C_f \times 10^6}{\sum_{i=1}^n (V_{gri} \times t_{ri}) \times C_v} \quad (4)$$

$$R_{v,r} = \left(1 - \frac{z}{100}\right) \times a \times C_v^{-c} \quad (5)$$

船 v 在航线 r 的评级可表示为式(6)和(7), 公式(6)中 d 表示年度碳强度指标, 单位为 $g/t \cdot n \text{ mile}$ 。式(7)中 d_1, d_2, d_3, d_4 分别是 A 和 B、B 和 C、C 和 D、D 和 E 的边界参数:

$$d = \frac{\alpha_{v,r}}{R_{v,r}} \quad (6)$$

$$I_{v,r} = \begin{cases} A, & d \leq d_1 \\ B, & d_1 < d \leq d_2 \\ C, & d_2 < d \leq d_3 \\ D, & d_3 < d \leq d_4 \\ E, & d \geq d_4 \end{cases} \quad (7)$$

2.1.2 模型建立

场景一模型为考虑部分船舶 CII 等级限制和船队 CII 等级 E 级最少的目标下对班轮航线配船进行优化, 构建的整数规划模型可以被描述成如下形式:

目标函数:

$$\min \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} N(I_{v,r} = E) x_{v,r} \quad (8)$$

式(8)以 CII 等级为 E 的数量最少为目标。

约束条件:

$$\sum_{v \in V} x_{v,r} = S_r, \forall r \in R \quad (9)$$

$$\alpha_{v,r} \leq T_v \quad (10)$$

$$\sum_{r \in R} x_{v,r} = 1, \forall v \in V \quad (11)$$

$$x_{v,r} \in (0, 1), \forall r \in R, \forall v \in V \quad (12)$$

其中, 约束条件(9)是对于任意一条航线, 分配的船舶数量等于该航线所需船舶数。约束条件(10)指

对于船 v 在航线 r 上的 CII 等级要满足设定船 v 的 CII 等级要求。约束条件(11)对于任意一艘船舶,每次只能分配给一条航线,公式(12)是决策变量的取值范围。

2.2 场景二模型构建

2.2.1 参数之间的关系

$$Q_{v,r} = M_{r,v} + A_{r,v} \quad (13)$$

$$D_{v,r} = \frac{365}{\sum_{i=1}^n t_{ri}/24} \quad (14)$$

$$p_{v,r} = \sum_{i=1}^n V_{gri} \times t_{ri} \quad (15)$$

$$\frac{D_{v,r}(Q_{v,r} - B_{v,r}) \times C_f + D_{v,r} B_{v,r} \times B_f}{D_{v,r} \times P_{v,r} \times C_v} \times 10^6 = T_v \quad (16)$$

式(13)中: $Q_{v,r}$ 表示航线 r 总的燃油消耗;式(14)中 $D_{v,r}$ 表示一年在航线 r 上航行的次数;式(15)中 $p_{v,r}$ 为船舶在航线 r 的总航行距离,可求得对于不满足等级要求时需要加注的生物燃料量。式(16)中 T_v 取需要满足船 v 限制要求等级的上限,可得到船 v 在航线 r 上所需的生物燃油量,如式(17)。

$$B_{v,r} = \frac{Q_{v,r} C_f - (p_{v,r} \times C_v T_v / 10^6)}{(C_f - B_f)} \quad (17)$$

2.2.2 模型建立

场景模型为考虑部分船舶 CII 等级限制和单年无 E 级船舶为目标的生物燃油使用最少目标下对班轮航线配船进行优化,构建的整数规划模型可以被刻画成如下形式。

目标函数为

$$\min \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} B_{v,r} x_{v,r} \quad (18)$$

约束条件为

$$\sum_{v \in V} x_{v,r} = S_r, \forall r \in R \quad (19)$$

$$\alpha_{r,v} > T_v \quad (20)$$

$$\sum_{r \in R} x_{v,r} = 1, \forall v \in V \quad (21)$$

$$x_{v,r} \in (0,1), \forall r \in R, \forall v \in V \quad (22)$$

其中,约束条件(19)是对于任意一条航线,分配的船舶数量等于该航线所需船舶数。约束条件(20)指对于船 v 在航线 r 上的 CII 等级要不满足设定船 v 的 CII 等级要求时,需要进行生物燃料加注。约束条件(21)对于任意一艘船,每次只能分配给一条航线。式(22)是决策变量的取值范围,式(20)中 $\alpha_{r,v}$ 计算如式(4)。

3 算例验证与分析

3.1 算例介绍

本研究参考了某大型班轮公司实际的航线计

划,51艘8500 TEU 船舶投放到5条班轮远洋航线。因此,本案例中假设船队由51艘8500 TEU 船舶组成,该船型载重吨为102500 DWT,其中主机每日油耗和航速关系经过实船数据分析后可拟合出如图1所示曲线,主机日耗量与航速的关系式如式(23),式中: X 表示航速, Y 表示日耗量。此外,假定该系列船辅机油耗为10.8 t/d。将51艘船投入选取的5条班轮航线中运营。如表2所示,展示了各航线上需要部署的船舶类型和船舶计划数量。表3展示了该航运公司指定的5条航线的班期表,其中包括了港口距离,计划航行时间等信息。船舶需按照对应的港口顺序和时间在计划期内重复航行。

$$Y = 0.0174X^3 - 0.15X^2 + 2.25X + 12.4 \quad (23)$$

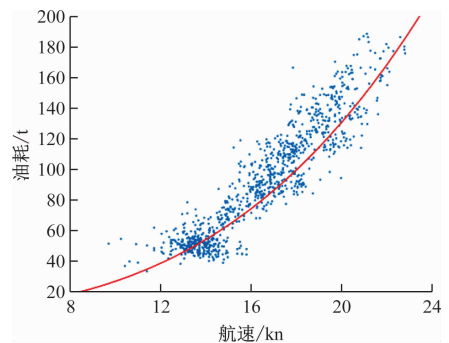


图1 8500 TEU 船航速与油耗关系图

Fig. 1 Relationship between speed and fuel consumption of 8500 TEU

表2 8500 TEU 系列船航线分布

Tab.2 Distribution of 8500 TEU series ship routes

航线	航线1	航线2	航线3	航线4	航线5
船舶数量/艘	10	12	11	6	12

表4展示的是航线各航段的比平均航速,其中航线3中航速区间有很大的跨越,该航线最高航速为19.1 kn,最低速度为12 kn,速度相差7.1 kn。航线1和航线5的平均航速较高。

为了考虑船舶航行性能不同对船舶航线配船的影响,以上文中提到的8500 TEU 船的主机油耗性能作为基线,见式(23)。

在正负5%的范围内随机生成了51艘船的航行性能的差异,如表5所示。为正数的表示油耗性能比基线高,同航速下油耗越高。反之,为负数的表示比基线低,同航速下油耗越低。结合图2可以看出,第26号船性能最差,比基线高了4.78%,第27号船性能最优,比基线低了4.73%,最优和最差船之间的性能相差了近9.51%。

表 3 航线各航段计划航行时间与航行里程
Tab. 3 Planned navigation time and mileage for each segment of the route

航段 编号	航线 1		航线 2		航线 3		航线 4		航线 5	
	时间/h	里程/n mile	时间/h	里程/n mile	时间/h	里程/n mile	时间/h	里程/n mile	时间/h	里程/n mile
1	6.75	121.5	30	510	3.25	44.2	7	119	27.75	416.25
2	25.75	463.5	30.75	461.25	18.5	342.25	255	4 335	8	108
3	15.75	283.5	31.75	508	31.5	601.65	30.5	533.75	57.5	805
4	512.75	8 460.4	335.5	5 703.5	7	125.3	64	1 024	95.75	1 436.25
5	2	36	68.75	1 100	499.5	6 993	250	3 750	1.5	21
6	85.25	1 449.3	156.25	2 500	107.5	1 730.75	9	162	365.75	5 669.125
7	34	476	78.75	1 346.63	30.25	363	39	546	141.75	1 842.75
8	24.25	388	12.5	212.5	93.75	1 125			21.5	279.5
9	89.75	1 346.3	12.75	210.38	87.25	1 352.375			0.25	3.5
10	0.25	3.5	216.5	3 702.15	622.5	9 337.5			125.25	1 628.25
11	551.75	8 276.3	63	1 102.5					349.75	5 596
12			392.75	5 302.13					178.5	2 499
13			79.25	1 030.25						
14			40	560						

表 4 航线各航段平均航速
Tab. 4 Average speed of each segment of the route

航段 编号	平均航速/kn				
	航线 1	航线 2	航线 3	航线 4	航线 5
1	18.00	17.00	13.60	17.00	15.00
2	18.00	15.00	18.50	17.00	13.50
3	18.00	16.00	19.10	17.50	14.00
4	16.50	17.00	17.90	16.00	15.00
5	18.00	16.00	14.00	15.00	14.00
6	17.00	16.00	16.10	18.00	15.50
7	14.00	17.10	12.00	14.00	13.00
8	16.00	17.00	12.00		13.00
9	15.00	16.50	15.50		14.00
10	14.00	17.10	15.00		13.00
11	15.00	17.50			16.00
12		13.50			14.00
13		13.00			
14		14.00			

表 6 展示了部分参数的初始值, T_v 表示在要求不同 CII 等级下需要满足的最上限值。表 7 展示了优化场景一和场景二部分船舶需要满足的 CII 等级

目标,其中场景二总体要求满足无 E 级的情况下,部分船舶满足 C 级目标。优化模型是典型的整数规划模型,因此本文运用 PuLP 开源求解器编程求解。

表 5 每条船与 8 500 TEU 船航行性能的差异

Tab. 5 Differences in Navigation Performance between Each Ship and 8 500 TEU Ship

单位: %

船舶代号	航行性能差异	船舶代号	航行性能差异	船舶代号	航行性能差异	船舶代号	航行性能差异
1	-3.94	14	-2.62	27	-4.73	40	1.51
2	-4.34	15	-0.98	28	0.67	41	-2.76
3	-3.27	16	-1.83	29	4.71	42	2.33
4	3.80	17	3.64	30	-3.98	43	2.56
5	-2.31	18	1.50	31	0.52	44	-1.90
6	1.65	19	-1.12	32	-2.19	45	-3.93
7	2.09	20	-3.58	33	-0.60	46	-2.15
8	3.23	21	-4.00	34	-2.66	47	2.03
9	-4.31	22	0.80	35	4.03	48	-1.32
10	-2.19	23	4.51	36	-4.55	49	-2.25
11	-2.16	24	-0.49	37	-4.60	50	0.97
12	0.33	25	-4.10	38	-1.80	51	2.39
13	-4.48	26	4.78	39	-4.02		

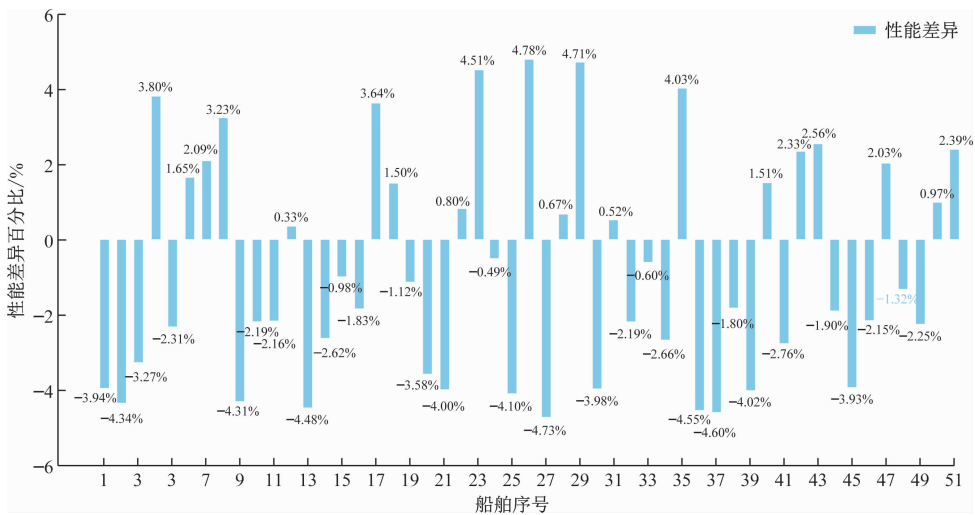


图 2 51 条船航行性能对比图

Fig. 2 Comparison of Navigation Performance of 51 Ships

表 6 参数表

Tab. 6 Parameter table

参数	数值	参数	数值
C_v/t	102 500	$z/\%$	7
	DWT	$R_{v,t}/(g/t \cdot n \text{ mile})$	6.54
$C_f/(g-CO_2/g-HFO)$	3.114		
$B_f/(g-CO_2/g-B24)$	2.65		
$q_{ac}/(t/d)$	10.1	$T_v =$	$\begin{cases} < 5.43, & A \\ 5.43, & B \\ 6.15, & C \\ 7.00, & D \\ 7.78, & E \end{cases}$

3.2 场景一优化结果分析

表 8、表 9 展示了在单船 CII 等级限制且 CII 等级为 E 的船舶数量最少的最优船队部署,可以看到船舶性能最差的 26 号船被分配在了航线 5。被分配在航线 1 的船舶航行性能比基线性能要好 1% 左右,且 CII 评级都维持在 D 级。表 9 是优化各航线评级分布情况,可以看到 C、D 评级的数量占了船队总数的 98%,说明船队大部分船舶已经满足了评级要求。航线 2 仍存在评级为 E 的船舶,因此为保证船舶履约,需要单独针对 18 号船进行生物燃料加注、降速等手段改善 CII 评级。

表7 部分船舶 CII 等级限制

Tab.7 Limitations on the CII level of some ships

优化场景	船舶代号	CII 等级目标
场景一	2	C
	4	D
	5	C
	13	C
	21	C
	27	C
	29	D
	36	C
	43	D
	46	C
场景二	1	C
	2	C
	3	C
	5	C
	13	C
	21	C
	27	C
	36	C
	46	C
	49	C
51	C	

图3展示了不同船队分配策略下E级船舶数量的分布情况:最左边灰色柱状图代表最差船队分配下的E级船舶数量,最右边灰色柱状图代表最优船队分配下E级船舶数量,中间的10个柱状图代表10种随机分配下的E级船舶数量,可以得到结论,相比于最差指派方案,船队E级船舶数量降低了95%,相比于随机指派方案,可平均降低88%。

3.3 场景二优化结果分析

优化场景一以船队CII等级E最少为目标,得出的结果保证了船队98%的履约程度,法规明确规定为每年评级为E或连续三年评级为D的船舶需要采取整改措施并编写入能效管理手册,因此以加注生物燃料最少为目标对目标船队进行船队分配,确保单年无E级船舶出现,还需确保表8中的部分船舶能达到CII等级为C的目标。

表10、11展示了在每条航线船舶分配的最优部署,需要加注生物燃料的航线是航线1和航线3,共

表8 优化后船舶航线分配以及等级情况

Tab.8 Optimized ship route allocation and level situation

船舶代号	所在航线	CII等级	船舶代号	所在航线	CII等级
1	航线2	D	27	航线3	C
2	航线5	C	28	航线1	D
3	航线1	D	29	航线3	D
4	航线3	D	30	航线2	D
5	航线3	C	31	航线2	D
6	航线5	D	32	航线1	D
7	航线5	D	33	航线2	D
8	航线3	D	34	航线4	D
9	航线2	D	35	航线3	D
10	航线2	D	36	航线5	C
11	航线4	D	37	航线2	D
12	航线2	D	38	航线1	D
13	航线5	C	39	航线4	D
14	航线1	D	40	航线5	D
15	航线1	D	41	航线1	D
16	航线4	D	42	航线5	D
17	航线3	D	43	航线5	D
18	航线2	E	44	航线1	D
19	航线2	D	45	航线4	D
20	航线4	D	46	航线3	C
21	航线5	C	47	航线5	D
22	航线5	D	48	航线1	D
23	航线3	D	49	航线2	D
24	航线1	D	50	航线3	D
25	航线2	D	51	航线3	D
26	航线5	D			

表9 优化后航线等级下船舶数量分布

Tab.9 Distribution of optimized route levels

航线	船舶数量/艘				
	A	B	C	D	E
航线1	0	0	0	10	0
航线2	0	0	0	11	1
航线3	0	0	3	8	0
航线4	0	0	0	6	0
航线5	0	0	4	8	0

计5艘船,需要加注的生物燃料最少为9 988.1 t。可以看到为了让51号船舶满足C级要求,需加注6 410.3 t生物燃油,占了整个船队燃料加注的

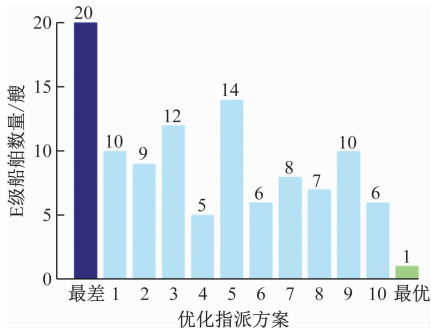


图 3 不同部署下评级为 E 的情况

Fig. 3 The situation of rating E under different deployments

表 10 所需加注生物燃油情况

Tab. 10 Requirements for adding biofuel 单位:t

船舶	航线	加注生物燃油	船舶	航线	加注生物燃油
1	航线 5	0	27	航线 5	0
2	航线 5	0	28	航线 2	0
3	航线 5	0	29	航线 5	0
4	航线 3	0	30	航线 1	0
5	航线 3	0	31	航线 1	0
6	航线 3	0	32	航线 2	0
7	航线 3	0	33	航线 2	0
8	航线 3	0	34	航线 1	0
9	航线 2	0	35	航线 5	0
10	航线 4	0	36	航线 5	0
11	航线 4	0	37	航线 1	0
12	航线 2	0	38	航线 2	0
13	航线 5	0	39	航线 1	0
14	航线 4	0	40	航线 1	1 555.5
15	航线 2	0	41	航线 2	0
16	航线 4	0	42	航线 3	0
17	航线 5	0	43	航线 3	0
18	航线 1	1 534.5	44	航线 1	0
19	航线 2	0	45	航线 2	0
20	航线 4	0	46	航线 3	0
21	航线 5	0	47	航线 3	0
22	航线 1	65.6	48	航线 2	0
23	航线 5	0	49	航线 3	0
24	航线 2	0	50	航线 1	422.3
25	航线 4	0	51	航线 3	6 410.3
26	航线 5	0			

35.8%, 可以考虑结合其他措施例如技改等共同提升该船 CII 等级。图 4 为不同船队部署下的生物燃

表 11 所需加注生物燃料航线分布

Tab. 11 Distribution of required biofuel refueling routes

航线	需要加注生物燃料船舶数量/艘	加注量/t
航线 1	4	3 577.8
航线 2	0	-
航线 3	1	6 410.3
航线 4	0	-
航线 5	0	-

料加注情况, 可以看到, 最优船队部署的情况下, 生物燃油需加注 9 988 t, 相比于最差指派方案可使生物燃油使用降低 96%, 相比于随机指派方案, 可平均降低 91%。

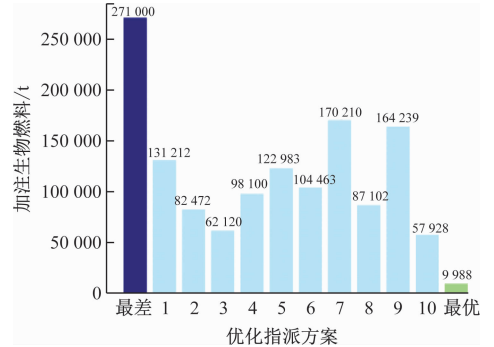


图 4 不同部署下生物燃料加注情况

Fig. 4 Biofuel refueling under different deployments situation

4 结束语

本文以 8 500 TEU 系列船舶为研究案例, 基于 5 条航线的未来航次计划, 对考虑单船 CII 等级限制的船队规划和以单年无 E 级船为目标的生物燃油使用优化问题进行了模型建立与算例分析。首先列明了航线航段的航行距离、航行时间以及平均航速的相关信息, 并且给出了 5 条航线上需要部署的 8 500 TEU 船队数量。其次介绍了船舶燃油计算与生物燃料加注计算。最后通过 PuLP 开源求解器求解整数规划优化模型, 得出在不同的优化目标下的船队最优部署, 在第一种优化情景下保证了船队 98% 的履约程度, 并且船队 E 级船舶数量相比于最差指派方案提升了 95%, 相比于随机指派方案, 可平均降低 88%。在第二种优化情境下, 保证了船队 100% 的履约程度, 但同时需要加注至少 9 988.1 t 的生物燃油, 相比于最差指派方案可使生物燃油使用降低 96%, 相比于随机指派方案, 可平均降低 91%。基于优化结果, 可以得出结论, 考虑船队中油耗性能差异, 从而进行合理的船队部署, 能够保持船

队 CII 履约的同时也降低了加注生物燃料所带来的经营成本,为航运企业完成碳减排目标提供重要决策建议。

本文研究采用的是静态优化方法,即假定在规划期内所有参数都是固定的,简化了问题的复杂性,这使得航运公司能够快速得到方案,从而有利于需要迅速做出运营决策的情况。但实际运营中还存在许多其他因素,如生物燃油价格、港口作业时间存在不确定性、船舶维修导致的计划变化、海况变化等不确定因素。在未来的研究中可以引入不确定参数、多目标优化来构建更为复杂的模型,探究不确定因素影响下的船队优化场景,降低船队碳排放水平,进一步提升航运公司绿色法规应对能力。

参 考 文 献

- [1] SARDAR A, ANANTHARAMAN M, ISLAM T M R, et al. Data collection framework for enhanced Carbon Intensity Indicator (CII) in the oil tankers [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2024.
- [2] LEE S. Investigation of Factors Influencing Carbon Intensity Indicator (CII) Rating [D]. Cardiff: Cardiff University, 2023.
- [3] 徐亦宁. BIMCO 关于 2022 年定期租船合同 CII 运营条款的解释说明 [J]. *中国远洋海运*, 2023, (1): 60-62.
XU Y N. BIMCO interpretation of 2022 [J]. *China COSCO Shipping*, 2023, (1): 60-62. (in Chinese)
- [4] 张付哲. 生效在即的 CII 对船舶运营影响几何? [J]. *中国航务周刊*, 2022, (46): 32-33.
ZHANG F Z. What is the impact of the effective CII on ship operation? [J]. *China Aviation Weekly*, 2022, (46): 32-33. (in Chinese)
- [5] BAYRAKTAR M, YUKSEL O. A scenario-based assessment of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and carbon intensity indicator (CII) regulations [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 278: 114295.
- [6] SUN L, WANG X, LU Y, et al. Assessment of ship speed, operational carbon intensity indicator penalty and charterer profit of time charter ships [J]. *Heliyon*, 2023, 9(10): 1-16.
- [7] 刘璐,季盛,张焱飞. 面向班期船的航运碳强度运营支撑系统构建研究 [J]. *船舶物资与市场*, 2023, 31(9): 10-14.
- LIU L, JI S, ZHANG Y F. Research on the construction of shipping carbon strength operation support system for shift ships [J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2023, 31(9): 10-14. (in Chinese)
- [8] 杜尊峰,樊涛,张庆巍. 基于不同动力集装箱船的支线运输综合调度优化 [J]. *中国航海*, 2024, 47(1): 111-120.
DU Z F, FAN T, ZHANG Q W. Comprehensive scheduling optimization of feeder transportation with fleet composed of container ships of different powers [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(1): 111-120.
- [9] KSCIUK J, KUHLEMANN S, Tierney K, et al. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: a literature review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 308(2): 499-524.
- [10] WANG Y, WANG S. Deploying, scheduling, and sequencing heterogeneous vessels in a liner container shipping route [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 151: 102365.
- [11] 钟铭,宋子豪,江伟祺. 不同碳减排政策下的班轮航线配船与航速优化 [J]. *中国航海*, 2024, 47(2): 111-119.
ZHONG M, SONG Z H, JIANG W Q. Fleet deployment and speed optimization under different carbon emission reduction policies [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(2): 111-119. (in Chinese)
- [12] 胡以怀,张华武,杨少波,等. 生物柴油在船用发动机上的应用探讨 [J]. *中国航海*, 2010, 33(3): 39-41.
HU Y H, ZHANG H W, YANG S B, et al. Investigation of bio-diesel application for marine engines [J]. *Navigation of China*, 2010, 33(3): 39-41. (in Chinese)
- [13] WATANABE M D B, CHERUBINI F, CAVALETT O. Climate change mitigation of drop-in biofuels for deep-sea shipping under a prospective life-cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 364: 132662.
- [14] XING H, STUART C, SPENCE S, et al. Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: pathways to 2050 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297: 126651.