

文章编号:1000-4653(2025)01-0174-06

基于双碳目标和 IMO 温室气体减排战略的 船队减碳路线研究

赵仲秋¹, 郝金凤¹, 强兆新¹, 李妍², 万燕鸣³, 张岩³

(1. 中船重工船舶设计研究中心有限公司, 北京 100081;

2. 中国船舶工业贸易有限公司, 北京 100048;

3. 北京国氢中联氢能科技研究院有限公司, 北京 100007)

摘要:为应对《IMO 船舶温室气体减排初步战略》和国内“3060 双碳目标”,提出了适用于国内船队的减碳路线。利用船队减碳分析模型,通过定义石化燃料、甲醇燃料和氨燃料路径,分析国内某航运公司船队基于上述燃料路径的碳减排量、碳强度和碳减排成本。研究表明:船队基于甲醇和氨燃料路径可满足《IMO 船舶温室气体减排初步战略》和国内“3060 双碳目标”的要求,近期可由传统燃油船型尽快过渡到甲醇/氨燃料 Ready(甲醇/氨燃料动力系统预设)船型,中远期陆续过渡到甲醇/氨燃料动力船型;绿甲醇和绿氨相比各有优势,未来中长期商业应用的多寡主要取决于绿甲醇和绿氨在可获得性、经济性等方面的差异。

关键词:船队减碳路线; 碳减排; 碳强度; 碳减排成本; 甲醇燃料; 氨燃料; 经济性

中图分类号:U663

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.022

Study of carbon reduction routes for fleets based on dual carbon targets and IMO GHG reduction strategies

ZHAO Zhongqiu¹, HAO Jinfeng¹, QIANG Zhaoxin¹, LI Yan², WAN Yanming³, ZHANG Yan³

(1. China Ship Design and Research Center Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2. China Shipbuilding Trading Co., Ltd., Beijing 100048, China;

3. China Hydrogen Alliance Research Institute Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In response to the IMO Preliminary Strategy for Greenhouse Gas Emission Reduction from Ships and the domestic "3060 Double Carbon Goal", carbon reduction routes applicable to the domestic fleet are proposed. Using the fleet carbon reduction analysis model, the carbon reduction amount, carbon intensity and carbon reduction cost of a domestic shipping company's fleet based on the above fuel routes are analyzed by defining the fossil fuel, methanol fuel and ammonia fuel routes. The results of the study show that the fleet based on methanol and ammonia fuel paths can meet the requirements of the "Preliminary Strategy for Ship Temperature IMO Room Gas Emission Reduction" and the domestic "3060 Double Carbon Goal", and that the fleet can be transitioned from the traditional bunker fuel type to the methanol/ammonia ready type as soon as possible in the near future, and then to methanol/ammonia powered type in the medium and long term. In the near future, we can transition from traditional fuel oil ships to methanol/ammonia fuel ready (methanol/ammonia fuel power system preset) ships as soon as possible, and in the middle and long term, we can gradually transition to methanol/ammonia fuel-powered ships; green methanol and green ammonia have their own advantages, and the number of future medium and long term commercial applications mainly depends on the differences between green methanol and green ammonia in the aspects of availability and economy.

收稿日期:2023-09-13

通信作者:赵仲秋(1988—),男,工程师,硕士,研究方向为船舶与海洋工程。E-mail:zhaozhongqiu@csdc.cn

引用格式:赵仲秋,郝金凤,强兆新,等. 基于双碳目标和 IMO 温室气体减排战略的船队减碳路线研究[J]. 中国航海,2025,48(1):174-179.

ZHAO Z Q, HAO J F, QIANG Z X, et al. Study of carbon reduction routes for fleets based on dual carbon targets and IMO GHG reduction strategies[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 174-179. (in Chinese)

Key words: fleet carbon reduction routes; carbon reduction; carbon intensity; carbon reduction costs; methanol fuel; ammonia fuel; economics

为应对气候变化带来的一系列影响,航运业正面临着脱碳所带来的挑战。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)于2018年制定了《IMO 船舶温室气体减排初步战略》^[1]。对此,全球航运业积极响应,同时一些区域性的航运减碳要求逐步明确,特别是欧盟等国家和地区提出了更加严苛的减碳要求。欧洲议会、欧盟理事会和欧盟委员会已就2024年起将航运纳入欧盟排放交易体系(EU ETS)达成协议^[2]。2020年9月,中国在联合国大会上提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。2021年10月,中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,提出碳达峰碳中和“1+N”政策体系,为这项重大工作进行系统谋划、总体部署。2022年11月,中国海事局颁布了《船舶能耗数据和碳强度管理办法》,自2022年12月22日起施行,有效期五年。航运减碳迫在眉睫^[3]。

目前,船队减碳路线方面的研究相对较少,主要以各国船级社发布的研究报告为主,其中,中国船级社(CCS)、美国船级社(ABS)和挪威船级社(DNV)等发布了航运减碳方面的相关研究成果。2021年,CCS发布《航运低碳发展展望2021》,主要从法规、技术成熟度、环保特性和可获得性等方面分析论证了国内船队减碳发展方向,提出“能效技术措施贯穿始终,船舶清洁燃料担当减排C位”^[4];ABS和DNV分析了液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)、甲醇和氨等燃料的供应链、安全性和经济性等现状,并简要描述了LNG、甲醇和氨燃料船型的未来设计方案^[5-6]。

以上研究成果为未来航运减碳指明了方向,但均未明确提出适用于当前船队的减碳路径,也未对各路径对应的碳强度和碳减排成本进行分析。本文以国内某船队为研究对象,利用船队温室气体减排分析模型,针对设定的绿色燃料路径场景,分析其船队建造成本、营运成本和燃料成本,对比分析不同绿色燃料路径的碳减排成本,提出了适用于目标船队的绿色升级方案。

1 船队燃料路径分析模型

本文采用船队温室气体减排分析模型中船队减碳成本分析模块,对不同燃料路径进行减碳成本对

比分析。船队温室气体减排分析模型是高技术船舶科研项目“绿色生态环保船工程专项”的研究成果,通过计算不同燃料路径的单位减碳成本进行船队减碳路线分析。

单位减碳成本公式为:

$$P_{DC} = (P_{newR} - P_{oriR}) / (Q_{CE-newR} - Q_{CE-oriR}) \quad (1)$$

式中: P_{DC} 为单位减碳成本, P_{newR} 为绿色燃料路径总成本, P_{oriR} 为石化燃料路径总成本, $Q_{CE-newR}$ 为绿色燃料路径总碳排放量, $Q_{CE-oriR}$ 为石化燃料路径总碳排放量。

船队总成本计算公式为:

$$P_A = \sum P_{Aj} = \sum (P_{Cj} + P_{Oj} + P_{Fj}) \quad (2)$$

式中: P_A 为船队总成本, P_{Aj} 为船队第 j 年总成本, P_{Cj} 为第 j 年建造成本, P_{Oj} 为第 j 年营运成本, P_{Fj} 为第 j 年燃料成本。

减碳量计算公式为:

$$Q_C = Q_{CE-newR} - Q_{CE-oriR} \quad (3)$$

式中: Q_C 为减碳量。

1.1 模型分析指标设定

本文依据IMO温室效应气体(Greenhouse Gas, GHG)初步战略和中国“3060双碳目标”的规定,设定船队碳减排总量和碳强度的评估指标。

IMO GHG初步战略为2030年碳排放强度至少降低40%(较2008年),2050年碳排放总量至少降低50%,碳排放强度至少降低70%(较2008年)。中国“3060双碳目标”为2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和。

1.2 模型分析关键参数取值确定

1.2.1 建造成本

建造成本主要体现在船舶造价上。低碳/零碳船舶造价与传统燃油动力船舶造价相比,造价增加主要体现在两个方面,一是由于动力燃料不同导致的造价增加,二是由于加装节能减排设备系统而增加的成本。

根据克拉克森船舶统计数据,针对船舶造价进行分类统计分析,不同吨位的散货船造价如图1所示。根据市场经营统计信息及预测,甲醇燃料动力船舶造价增加10%~15%;LNG燃料动力船舶造价增加15%~30%;氨燃料动力船舶造价与LNG船相当。

根据高技术船舶科研项目“绿色生态环保船工

程专项”的研究成果,节能减排设备的成本随船舶吨位及系统复杂程度有所变化。基于研究成果,本文将其造价分为低、中、高三个等级,限制轴功率(Engine Power Limitation, EPL)、艏部节能装置、轴带发电机(Power Take Out, PTO)、气层减阻和风力助推转子的造价如图2所示。

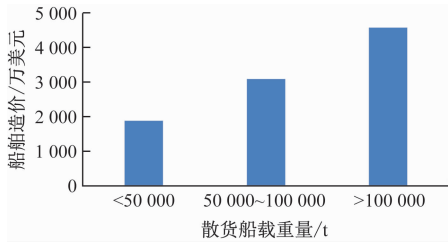


图1 船舶造价统计

Fig. 1 Statistics of ship cost

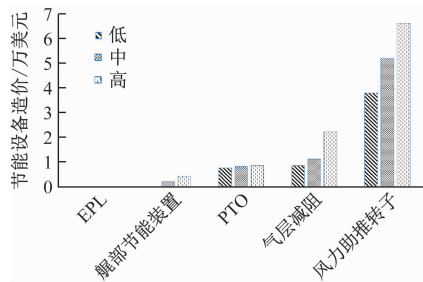


图2 节能装置造价统计

Fig. 2 Statistics of the cost of marine energy-saving devices

1.2.2 营运成本

船队营运成本主要包括船员费用、停航费用、润滑油成本、维修/保养成本、保险费用、管理费用和港口费用等。根据常规的船舶营运费用统计分析,本文采用如下经验公式进行估算:

$$P_{Oj} = P_{Cj-all} \times 0.05 \quad (4)$$

式中: P_{Cj-all} 为第 j 年船队所运营船舶的总建造成本。

$$P_{Cj-all} = \sum P_{Cj-i} \times N_i \quad (5)$$

式中: P_{Cj-i} 为第 j 年某 i 型船舶造价, N_i 为 i 型船舶的数量。

1.2.3 碳排放系数

依据 ABS、CCS 等船级社发布的船舶燃料研究成果,分析梳理船用重燃油(Heavy Fuel Oil, HFO)、船用柴油(Marine Diesel Oil, MDO)、LNG、甲醇和氨燃料的能源从开采到船端使用(Tank to Wheel, TTW)和能源于船端使用(Well to Wheel, WTW)的碳排放系数^[7-8],见表1。

1.2.4 燃料价格

根据国际能源署和国际可再生能源署的统计数据,不同能源燃料的价格如图3所示。

表1 碳排放系数

Tab. 1 Carbon emission coefficient

燃料	单位:g/MJ		
	CO ₂ TTW	CO _{2e} TTW	CO _{2e} WTW
HFO	77.5	77.6	87.2
MDO	75.1	76.1	93.5
LNG	57.3	59.6	78.1
甲醇(灰)	69.1	76.1	98.1
甲醇(蓝)	69.1	76.1	81.0
甲醇(绿)	69.1	76.1	22.2
氨(灰)	0	0	100.6
氨(蓝)	0	0	20.9
氨(绿)	0	0	22.2

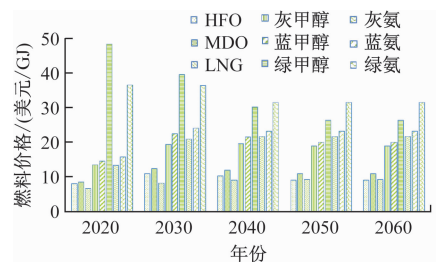


图3 燃料价格

Fig. 3 Fuel price

1.2.5 考虑节能减排措施的应用渗透率

根据 IMO、ABS、英国劳氏船级社(LR)、DNV 等机构的相关研究成果^[7-13],分析预测 EPL、艏部节能装置、PTO、气层减阻和风力助推转子等绿色节能技术在船舶建造中的应用渗透率,如图4所示。

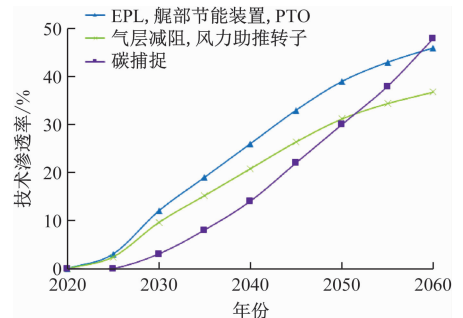


图4 技术渗透率

Fig. 4 Technical permeability

2 目标船队燃料路径评估分析

2.1 燃料路径的定义

目标船队由4万~10万吨级散货船组成,以内贸散货运输为主。本文设定三个典型的燃料路径场景,分别为以石化燃料为主的混合燃料路径P1、甲醇燃料路径P2、氨燃料路径P3。基于分析结果和目

标船队特点,衍生出甲醇燃料优化路径和氨燃料优化路径两个场景。典型燃料路径见表 2。

表 2 燃料路径定义
Tab.2 Fuel path definition

路径名称	燃料组合	节能减排措施
石化燃料路径 P1	HFO/MDO、LNG、甲醇和氨(灰-蓝-绿)	EPL、艏部节能装置、PTO、气层减阻、风力助推转子、碳捕捉
甲醇燃料路径 P2	HFO/MDO、甲醇(灰-蓝-绿)	EPL、艏部节能装置、PTO、气层减阻、风力助推转子、碳捕捉
氨燃料路径 P3	HFO/MDO、甲醇(灰)、氨(蓝-绿)	EPL、艏部节能装置、PTO、气层减阻、风力助推转子、碳捕捉

根据国际能源署预测^[14],到 2050 年海运能源中石化燃料(燃油和天然气)占比约为 58%,低碳和/或零碳燃料占比将达到 42%。基于此预测,并结合目标船队能源规划策略,设定路径中燃料占比及应用进程。石化燃料路径 P1 主要燃料为 HFO/MDO 和 LNG,氨燃料和甲醇燃料逐步应用;甲醇燃料路径 P2 的主要燃料为绿甲醇,HFO/MDO、灰甲醇和蓝甲醇为过渡性燃料;氨燃料路径 P3 的主要燃料为绿氨,HFO/MDO、灰甲醇和蓝氨为过渡性燃料。燃料路径见图 5~图 7。

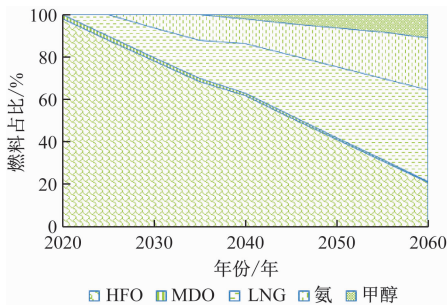


图 5 石化燃料路径(P1)

Fig.5 Petrochemical fuel pathway(P1)

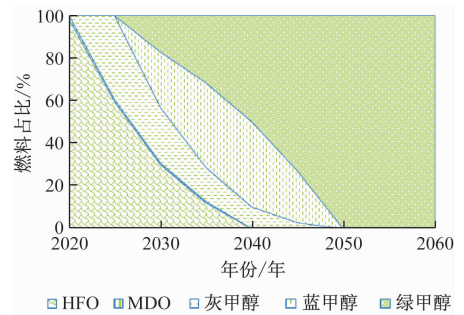


图 6 甲醇燃料路径(P2)

Fig.6 Ethanol fuel pathway(P2)

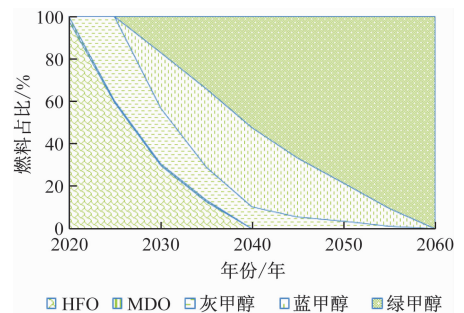


图 7 氨燃料路径(P3)

Fig.7 Ammonia fuel pathway(P3)

2.2 碳减排成本分析

采用船队温室气体减排分析模型对上述三条燃料路径进行碳减排和减碳成本评估,结果表明,即使考虑了 20% 的碳捕捉,石化燃料路径 P1 的温室气体减排及碳强度均不满足中国“3060 双碳目标”和 IMO 的要求,因此,目标船队应适时考虑低碳/零碳

燃料的应用。甲醇燃料路径 P2 和氨燃料路径 P3 的温室气体减排及碳强度均满足中国“3060 双碳目标”和 IMO 的要求,减碳成本分别为 98 美元/t 和 115 美元/t。三条燃料路径的碳减排、船队碳强度和减碳成本情况见表 3。

表 3 各燃料路径评估结果
Tab.3 Assessment results of each fuel path

路径	碳总量减排			碳强度降低			减碳成本/ (美元/t)	IMO GHG 战略	“3060 双碳目标”
	2030 年	2050 年	2060 年	2030 年	2050 年	2060 年			
P1	↑24%	↑123%	↑183%	↓40%	↓59%	↓60%		不满足	不满足
P2	↑52%	↓50%	↓100%	↓40%	↓82%	↓100%	98	满足	满足
P3	↑47%	↓50%	↓100%	↓40%	↓90%	↓100%	115	满足	满足

3 目标船队优化升级

基于上述燃料路径评估,甲醇路径 P2、氨燃料路径 P3 都是可行的路径。其中,甲醇燃料路径 P2 减碳成本更低,而由于氨燃料的能量密度和可获得性,对于远航程的大型船舶也具有较强竞争力。船队低碳/零碳燃料应用转换过程中,需要投入大量资金,在综合考虑投资和船队升级需求的基础上,进一

表 4 甲醇燃料优化路径定义

Tab. 4 Definition of methanol fuel optimization path

路径名称	新造船型/燃料方案	说明
甲醇燃料路径 P2	2020 ~ 2060 年: 甲醇动力 2030 ~ 2060 年: 碳捕捉(10%)	优化前初始路径
甲醇燃料路径 P2-1	2020 ~ 2030 年: 甲醇 Ready 2030 ~ 2060 年: 甲醇动力 + 碳捕捉(10%)	甲醇 Ready 船型开发应用
甲醇燃料路径 P2-2	2020 ~ 2030 年: 甲醇 Ready 2030 ~ 2060 年: 甲醇 Ready + 碳捕捉、甲醇动力 + 碳捕捉(10%)	甲醇 Ready 船型深度应用
甲醇燃料路径 P2-3	2030 ~ 2060 年: 基于 P2-2, 碳捕捉提升至 20%	实现 2050 年碳中和

升级优化路径 P2-1、P2-2 和 P2-3 减碳成本分别为 97 美元/t、91 美元/t 和 107 美元/t。

3.2 氨燃料路径优化升级

为降低氨燃料路径的减碳成本及前期资金投入压力,对氨燃料路径 P3 进行优化升级,分别从氨 Ready 船型开发应用、氨 Ready 船型深度应用和“2050 年碳中和”三个方面形成氨燃料路径 P3-1、P3-2 和 P3-3,具体见表 5。

表 5 氨燃料优化路径定义

Tab. 5 Definition of ammonia fuel optimization path

路径名称	新造船型/燃料方案	说明
氨燃料路径 P3	2020 ~ 2060 年: 甲醇/氨动力 2050 ~ 2060 年: 碳捕捉(10%)	优化前初始路径
氨燃料路径 P3-1	2020 ~ 2030 年: 甲醇/氨 Ready 2030 ~ 2050 年: 甲醇/氨动力 2050 ~ 2060 年: 甲醇/氨动力 + 碳捕捉(10%)	氨 Ready 船型开发应用
氨燃料路径 P3-2	2020 ~ 2030 年: 氨 Ready 2030 ~ 2060 年: 氨 Ready + 氨动力 + 碳捕捉(10%)	氨 Ready 船型深度应用
氨燃料路径 P3-3	2050 ~ 2060 年: 基于 P3-2, 碳捕捉提升至 20%	实现 2050 年碳中和

升级优化路径 P2-1、P2-2 和 P2-3 减碳成本分别为 113 美元/t、107 美元/t 和 92 美元/t。

步针对路径 P2、P3 进行细化评估。

3.1 甲醇燃料路径优化升级

为降低甲醇燃料路径 P2 的减碳成本及前期资金投入压力,对甲醇燃料路径 P2 进行优化升级,分别从甲醇 Ready 船型开发应用、甲醇 Ready 船型深度应用和“2050 年碳中和”三个方面形成甲醇燃料路径 P2-1、P2-2 和 P2-3,具体见表 4。

3.3 碳减排成本分析

评估结果表明,氨燃料路径 P3 总成本最高,甲醇燃料路径 P2 次之,石化燃料路径 P1 最低,主要原因是氨燃料路径的建造成本、营运成本和燃料成本最高。

氨燃料路径 P3 的总成本和碳减排成本虽高于甲醇燃料路径 P2,但氨燃料的优势在于较高的碳减排量,在未考虑碳捕捉的情况下,可实现满足 IMO 温室气体减排和碳强度的要求。DNV 也指出氨 Ready 船舶具有更好的经济性^[11]。燃料路径总成本及减碳成本如图 8 所示。

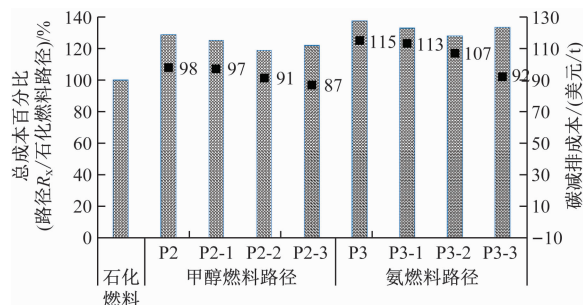


图 8 燃料路径总成本及减碳成本

Fig. 8 Total cost of fuel paths and carbon reduction cost

3.4 甲醇燃料路径优化案例分析

路径 P2-1: 新造船为燃油 + 甲醇 Ready 路径,总成本支出后移,降低 2020 ~ 2029 年船队发展总成本投入,2030 年开始应用甲醇燃料,较初始甲醇燃料路径,成本出现突增,但 2020 ~ 2030 年总成本(考虑

5% 贴现率)降低约 12%。

路径 P2-2:新造船采用燃油 + 甲醇 Ready 路径,总成本支出后移,降低 2020 ~ 2029 年船队发展总成本投入,2030 年开始应用绿甲醇,较初始甲醇燃料路径,成本出现突增,2020 ~ 2060 年总成本及减碳成本分别降低约 7.9% 和 7.1%,若此路径不采用灰甲醇、蓝甲醇,总成本和减碳成本最低。

路径 P2-3:较初始甲醇燃料路径,总成本增加约 2.5%,减碳成本降低约 4.5%。

3.5 氨燃料路径优化案例分析

路径 P3-1:新造船为燃油 + 甲醇/氨 Ready 路径,总成本支出后移,降低 2020 ~ 2029 年船队发展总成本投入,2030 年开始应用甲醇燃料过渡,成本出现突增,但 2020 ~ 2030 年总成本(考虑 5% 贴现率)会降低约 14%。

路径 P3-2:新造船为燃油 + 氨 Ready 路径,总成本支出后移,降低 2020 ~ 2029 年船队发展总成本投入,2030 年开始应用氨燃料过渡,成本出现突增,较初始氨燃料路径,2020 ~ 2060 年总成本及减碳成本均降低约 7%。

路径 P3-3:较初始氨燃料路径,总成本增加约 3%,减碳成本降低约 20%。

4 结论

分别基于石化燃料路径 P1、绿甲醇燃料路径 P2 和绿氨燃料路径 P3 对某航运公司船队的碳强度和 GHG 减排进行评估,结果表明:

1) 以石化燃料为主的路径 P1 不满足 IMO GHG 减排要求和国内“3060 双碳目标”;

2) 以绿甲醇为主要燃料的路径 P2,在 2030 ~ 2060 年考虑 10% 碳捕捉,则满足 IMO GHG 减排要求和国内“3060 双碳目标”,并实现 2060 年碳中和;

3) 以绿氨为主要燃料的路径 P3,在 2050 ~ 2060 年考虑 10% 碳捕捉,则满足 IMO GHG 减排要求和国内“3060 双碳目标”,并实现 2060 年碳中和。

综上所述,目标船队可行且考虑经济压力适当的减碳路线是由当前传统燃油船尽快过渡到甲醇/氨 Ready 船型,中远期陆续过渡到甲醇/氨燃料动力船,在甲醇燃料具有较好可获得性的情况下,可直接建造运营甲醇燃料动力船舶,船型方案如图 9 所示。

根据目标船队的总体状态,船队现有船舶需经改装满足现有船舶能效指数(Energy Efficiency Existing ship Index, EEXI)、碳强度指标(Carbon Intensity Indicator, CII)的相关要求,新造船需满足船舶能效设计指数(Energy Efficiency Design Index, EE-

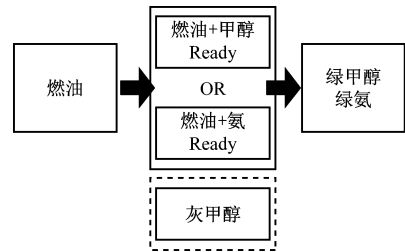


图 9 目标船队船型方案

Fig. 9 Ship type scheme of target fleet

DI) 及适当运营时期的 CII 要求,船队只有进行全面绿色升级,才能实现整体的减碳目标。在进一步深入分析的基础上,细化执行节点,形成船队的绿色升级方案,如图 10 所示。

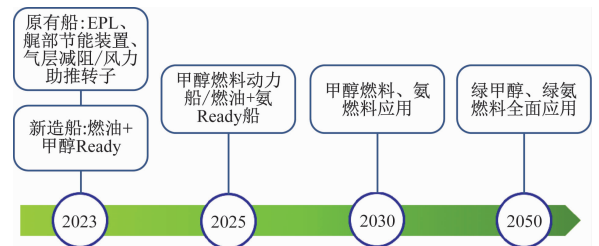


图 10 目标船队减碳路线

Fig. 10 Carbon reduction roadmap of target fleet

基于石化、甲醇和氨燃料路径评估结果,以及甲醇、氨燃料路径优化升级方案,形成船队升级方案如下:

1) 2023 年采用 EPL、艏部节能装置、气层减阻/风力助推转子等措施改装现有船,以满足 EEXI/CII 要求及类似国内船舶能效要求;新建船舶采用燃油 + 甲醇 Ready 动力;

2) 2025 年新建甲醇燃料动力船、燃油 + 氨 Ready 船;

3) 2030 年甲醇燃料、氨燃料应用;

4) 2050 年绿甲醇、绿氨燃料全面应用。

综上,为满足 IMO GHG 减排和国内“3060 双碳目标”要求,以及降低船队整体成本支出,建议航运公司新造船采用甲醇 Ready 和氨 Ready 船型方案,以绿甲醇和绿氨作为替代燃料。绿甲醇和绿氨各有优势,甲醇技术过渡较成熟、法规明确且成本偏低,氨燃料具备无碳优势但成本偏高,未来中长期商业应用的多寡主要取决于绿甲醇和绿氨在可获得性、经济性等方面的差异。

参 考 文 献

- [1] 赵翠云,魏声亮.“碳达峰、碳中和”背景下中国航运业碳减排国际经验借鉴[R]. 上海:上海国际航运研究中心,2022: 1-6.

- [16] 交通运输部. 国家水上交通安全监管和救助系统布局规划(2005—2020) [R/OL]. (2007-06-27) [2023-09-14]. https://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/hangdaozhengzhi/xiangguanzhengce/201510/t20151015_1902622.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Layout plan for national water traffic safety supervision and rescue system(2005—2020) [R/OL]. (2007-06-27) [2023-09-14]. https://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/hangdaozhengzhi/xiangguanzhengce/201510/t20151015_1902622.html. (in Chinese)
- [17] 交通运输部. 交通运输部关于修改《水上交通事故统计办法》的决定[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(33): 54-58.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Decision on amending the statistical measures for water traffic accidents of Ministry of Transport of the People's Republic of China[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(33): 54-58. (in Chinese)
- [18] 交通运输部综合规划司.《国家船舶溢油应急设备库设备配置管理规定》(试行)[R]. 北京: 交通运输部, 2008.
Comprehensive Planning Department of the Ministry of Transport. Regulations on equipment configuration management of national ship oil spill emergency equipment warehouse (to try out) [R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2008.
- [19] 艾云飞, 吕靖, 张丽丽, 等. VTS 雷达站选址-雷达配置优化模型[J]. 中国航海, 2014, 37(4): 54-58.
AI Y F, LYU J, ZHANG L L, et al. Optimization model of VTS radar station allocation and radar system configuration[J]. Navigation of China, 2014, 37(4): 54-58. (in Chinese)
- [20] 童孟达. 长江三角洲区域港口一体化深化推进思考[J]. 中国港口, 2020(1): 26-30.
TONG M D. Reflections on deepening the integration of ports in the Yangtze River delta region[J]. China Ports, 2020(1): 26-30. (in Chinese)

(上接第 179 页)

- ZHAO C Y, WEI S L. International experience on carbon emission reduction of China's shipping industry in the context of "carbon peak, carbon neutrality" [R]. Shanghai: Shanghai International Shipping Institute, 2022: 1-6. (in Chinese)
- [2] 孙峰, 林正锦, 常圣岱. 欧盟一揽子气候立法与政策提案, 对航运业影响几何? [J]. 中国船检, 2021(8): 65-69.
SUN F, LIN Z J, CHANG S D. How will the EU's package of climate legislation and policy proposals affect the shipping industry? [J]. China Ship Survey, 2021(8): 65-69. (in Chinese)
- [3] 周晓, 冷瑜. 航运业碳减排和零碳发展面临的挑战与应对建议[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2021, 44(4): 63-68.
ZHOU X, LENG Y. The challenges and countermeasures of developing zero-emission shipping [J]. Journal of Shanghai and Shipping Research Institute, 2021, 44(4): 63-68. (in Chinese)
- [4] 中国船级社. 航运低碳发展展望 2021 [R]. 北京, 2021: 1-23.
China Classification Society. Prospects for low-carbon development of shipping in 2021 [R]. Beijing, 2021: 1-23.
- [5] ABS. Pathways to sustainable shipping [R]. Spring, 2022: 1-107.
- [6] ERIKSEN R. Energy transition outlook [R]. Oslo, 2022: 1-19.
- [7] ABS. Energy efficiency advisory [R]. Houston, 2022: 1-76.
- [8] 中国船级社. 绿色生态船规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
China Classification Society. Rules for green eco-ships [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2020. (in Chinese)
- [9] 甘爱平, 真虹. 我国航运低碳减排与碳金融交易的市场引导机制[J]. 交通企业管理, 2016, 31(12): 4-7.
GAN A P, ZHEN H. Market guidance mechanism for low-carbon emission reduction and carbon finance trading in China's shipping industry [J]. Transportation Enterprise Management, 2016, 31(12): 4-7. (in Chinese)
- [10] IMO. Fourth IMO GHG study 2020 [R]. Delft, 2020: 1-524.
- [11] ABS. Methanol as marine fuel [R]. Spring, 2021: 1-28.
- [12] DNV. DNV Maritime Forecast 2050 [R]. Oslo, 2022: 1-84.
- [13] Japan Ship Technology Research Association. Roadmap to zero emission from international shipping [R]. Tokyo, 2020: 1-136.
- [14] IEA. World energy outlook 2021 [R]. Paris, 2022: 1-386.