

# 全球船舶排放“碳中和”路线与政策分析

马常海<sup>1</sup>, 安彦召<sup>2</sup>, 窦全礼<sup>1</sup>, 孙 凯<sup>2</sup>

(1. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261001; 2. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** [目的]为了实现国际海事组织(IMO)提出的船舶运输 CO<sub>2</sub> 排放强度到 2030 年及 2050 年分别下降 40%和 70%的目标, 并应对船舶燃料碳含量高所带来的减排挑战, 海运业的“碳中和”路线及政策已成为当前研究热点。[方法]围绕 IMO 船舶温室气体减排目标, 提出了船舶“碳中和”3 个阶段的推进策略, 并通过产业端、燃料端及动力装置端协同发力, 形成过程减碳和源头控碳相结合的船舶“碳中和”路线。[结果]通过实施“碳中和”路线, 一方面, 可推进船舶动力节能提效及总体优化, 降低运行过程中的碳排放, 包括发动机效率提升、推进系统优化和新材料应用等; 另一方面, 大力发展多种低/零碳替代燃料, 如氢、氨和甲醇等, 并结合各国能源结构选择合适的碳中性燃料路径。在政策方面, IMO 制定的碳强度指标(CII)、现有船舶能效指数(EEXI)等将进一步推动船舶海运业脱碳。[结论]未来, 需建立全生命周期评价系统, 确保燃料低/零碳化, 并促进基于可再生能源的氢能制备技术发展, 以实现航运业的可持续发展。

**关键词:** 船舶排放; “碳中和”路线; 节能提效; 低/零碳燃料; 全生命周期评价

**中图分类号:** TK401 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2025.11.07

## Analysis of Carbon Neutrality Routes and Policies for Global Maritime Emission

MA Changhai<sup>1</sup>, AN Yanzhao<sup>2</sup>, DOU Quanli<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>2</sup>

(1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261001, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** [Purpose] To achieve the International Maritime Organisation's (IMO) targets of reducing CO<sub>2</sub> emissions intensity from shipping by 40% by 2030 and 70% by 2050, and to address the emissions reduction challenges posed by the high carbon content of marine fuels, the maritime industry's carbon neutrality pathways and policies have become a current research focus. [Method] In this regard, the paper focuses on the IMO ship greenhouse gas emission reduction target, integrates a three-stage promotion strategy for ship carbon neutrality, and forms two emission reduction routes of process carbon reduction and source carbon control through the synergistic efforts of the industrial end, the fuel end and the power unit end. [Result] Through the implementation of carbon neutrality route, on the one hand, promote energy-saving and efficiency improvements of ship power, as well as overall optimization, to reduce carbon emissions during operation, including engine efficiency improvement, propulsion system optimization and application of new materials. On the other hand, vigorously develop a variety of low-carbon alternative fuels, such as hydrogen, ammonia, methanol, etc., and choose the appropriate paths in the light of the energy structure of each country. In terms of policy, IMO's carbon intensity indicator (CII) and energy efficiency existing ship index (EEXI) will further promote the decarbonization of the maritime industry. [Conclusion] In the future, a full life-cycle evaluation system needs to be established to ensure the decarbonization of fuels and to promote the development of technologies such as hydrogen production from

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-06-07

作者简介: 马常海(1974—), 男, 硕士、教授级政工师。研究方向: 内燃机前沿技术。

renewable energy sources, so as to achieve the sustainable development of the shipping industry.

**Key words:** vessel emission; carbon neutral route; energy conservation and efficiency improvement; low/zero carbon fuel; full life cycle assessment

## 0 引言

全球气候变暖是当前人类面临的重大环境挑战。国际航运业作为全球贸易的主要运输方式,承担着约90%的国际贸易货运量,其温室气体排放总量约占全球总排放量的3%<sup>[1]</sup>。因此,作为主要运输方式之一的船舶航运业成为减少碳排放的关键领域。为应对这一挑战,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)制定了明确的减排目标:以2008年为基准,到2030年将船舶单位运输功的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放强度降低40%,到2050年争取降低70%,并致力于在21世纪内实现航运业的温室气体净零排放<sup>[2]</sup>。随着《巴黎协定》的实施以及各国“碳中和”目标的推进,航运业的碳减排问题受到国际社会的日益关注,促使行业环保法规不断升级。在此背景下,国际航运业逐渐加速绿色低碳转型,通过技术创新和政策引导推动可持续发展<sup>[3-5]</sup>。

## 1 船舶排放“碳中和”基本内涵

通过综合不同机构和学者的观点<sup>[6]</sup>,本文提出了一个较为严谨和全面的定义:“碳中和”指在特定时间内,每一个对象(全球、国家、企业和某产品等)直接或间接产生的CO<sub>2</sub>或温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式,以抵消自身产生的CO<sub>2</sub>或温室气体排放量,实现正负抵消,达到相对“零排放”。“碳中和”实际强调的是最终达成的一种状态。

实现船舶排放“碳中和”可以从产业端、燃料端以及动力装置端(碳捕集)入手,实现碳循环利用。在产业端,通过采用绿电冶金工艺降低造船钢材的隐含碳排放,同时结合碳捕集技术实现造船过程的碳闭环管理。在燃料端,船舶航运可采用低碳、净零碳、零碳以及“碳中和”燃料(绿电合成燃料),从而在源头上控制碳排放。动力装置端则需双管齐下,通过高效燃烧技术、废热回收系统等提升能源转换效率,同时开发船用紧凑型碳捕集装置实现尾气碳资源化利用,以此实现船舶航运过程中的减碳目标。

## 2 船舶排放“碳中和”关键问题

作为行业监管主体,IMO持续将航运减排纳入优先议程,并将其定位为行业可持续发展的战略性议题。2011年,IMO创新性地推出船舶能效设计指数(Energy Efficiency Design Index, EEDI)体系,该技术标准通过量化新造船舶的单位运输功碳排放强度,从设计阶段引导船舶工业向低碳化方向转型。随后,在2018年,IMO进一步出台了《减少船舶温室气体排放的初步战略》,这份战略文件从宏观层面为航运业应对气候变化绘制了清晰的路线图,涵盖从设定长远愿景、明确减排强度,到确立行动原则、规划阶段性措施以及评估潜在影响等多个维度,为航运业绿色转型提供了全面系统的指导框架<sup>[7-8]</sup>。国际航运业针对温室气体排放的要求见图1。

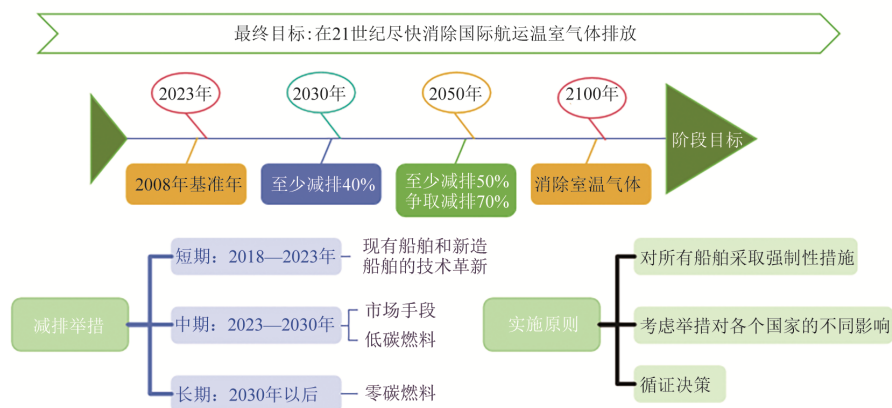


图1 国际航运业针对温室气体排放的要求

Fig. 1 International Shipping Requirements for Greenhouse Gas Emissions

船舶燃料的碳含量大约为86%,每燃烧1 t燃料,约释放出3.15 t CO<sub>2</sub>。2023年全球船舶运输行业排放的CO<sub>2</sub>总量为0.655 Gt, 占全球总排放量的1.75%。

与2008年相比,2023年全球船舶运输的碳排放量降低了34.5%。然而,这一减排幅度与IMO设定的2050年温室气体至少减排50%的目标仍存在很大差距<sup>[1]</sup>。

国际能源署研究显示，即便全球能源系统于2050年达成“碳中和”，航运业仍难以成为完全零排放的行业。在向低碳燃料转型之前，短期内航运业碳排放的降低主要依赖于能源效率的提升。根据国际能源机构（International Energy Agency, IEA）的预测，直至2030年，化石燃料在船舶燃料中所占比例依然接近80%，但氢燃料和生物能源的占比将逐渐超过液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG）。到2040年，化石燃料的占比预计会缩减至40%，氢燃料的占比则上升至40%。到21世纪中叶，氢燃料的占比有望超过60%，其中氨燃料将成为主要组成部分，占比达到45%。然而，实现这一转型路径亟需政策干预以突破绿氢制备成本瓶颈并建立规模化的供应链体系<sup>[7]</sup>。因此，可再生能源制氢技术与氨合成工艺革新将成为航运“碳中和”的核心技术突破口。

2.1 航运零碳燃料制备

在未来一段时间内，航运业将呈现多元化燃料并存的过渡局面。目前，从传统柴油、低硫油到LNG、甲醇、氢气、氨气以及燃料电池等多种替代燃料，均已进行了相关应用探索与实践验证<sup>[9-11]</sup>。然而，目前航运企业和行业机构尚未形成统一的技术路线共识。不仅需要适应行业发展需求，还需结合各国差异化的能源结构与国情进行综合考量。在此背景下，航运企业需建立基于全生命周期评估的燃料选择模型，通过量化不同情景下的碳强度和总拥有成本，制定适合自身的零碳转型策略。

在欧洲，以丹麦和挪威为代表的北欧国家正将生物燃料定位为航运业深度脱碳的核心技术路径。挪威政府为达成2030年航运碳排放强度降低50%的目标，系统性推进生物柴油（Fatty Acid Methyl Ester/Hydrotreated Vegetable Oil, FAME/HVO）与生物甲烷（Bio-CH<sub>4</sub>）的产业化应用，其政策实施框架包含3个关键层面：

1）立法层面。议会已审议《可持续船用燃料配额法案》草案。

2）行政层面。气候环境部牵头组建跨部门工作组，整合海事局、环境署等机构开展生物燃料全生命周期环境影响评估。

3）技术层面。通过创新署、研究理事会等科研机构资助推动第二代生物燃料（纤维素乙醇）和第三代生物燃料（藻类柴油）的研发突破。

与此同时，日本基于其能源安全战略提出了差异化技术路线：

1）采用渐进式燃料替代策略，依托现有LNG加注网络，分阶段引入Bio-CH<sub>4</sub>（可再生天然气）和合成甲烷。

2）在继续使用LNG燃料的基础上，逐步发展液氨和液氢燃烧技术。

然而，在航运业低碳燃料技术路线的选择上，各企业呈现显著的策略分化现象。马士基集团将绿色氨燃料定位为中长期战略选择，率先在近海航运领域推进甲醇燃料的规模化商业化应用。马士基集团于2023年发布国际上首艘“碳中和”集装箱船，该船采用可再生甲醇作为主要动力源，实现污染物零排放<sup>[12]</sup>。欧洲在对燃氢船舶的前沿探索与研究领域处于领先地位，主导并推进了多个关键的燃氢船舶开发项目。挪威凭借其完善的氢能产业链优势，主导了包括HySHIP号液氢运输船、Norled号氢燃料电池渡轮等具有里程碑意义的示范项目<sup>[13]</sup>。挪威是氢燃料海运应用领域的全球领跑者，已构建出了一系列相对成熟的产业化发展体系<sup>[14]</sup>。

对我国而言，生物燃料并非最佳选择。从能源结构来看，我国煤炭储备丰富，是生产甲醇的理想原料。因此，推广甲醇燃料在航运业的应用，不仅有助于降低我国对油气资源的依赖，还能在战略层面保障我国航运业的能源安全。劳氏船级社对零碳燃料进行了全面研究，涵盖了燃料加注、储存、加工、转换和推进等多个环节。研究发现，所有零碳燃料均存在应用局限，且在关键技术层面面临共性挑战。这些研究结果为航运业的低碳转型提供了重要技术参考，见表1<sup>[15]</sup>。

表 1 船用低碳动力比较  
Tab. 1 Comparison of Vessel Low Carbon Power

动力燃料类型	LNG	甲醇	生物燃料	电	液氢	氨
能量密度	高	高于液氨	高	无	低	比液氢高 50%
减排效果	10%~30%	10%~90%	70%~90%	因电力结构而异	100%	50%~80%
环境风险	天然气泄漏	仍会产生 CO <sub>2</sub> 排放	原料限制导致价格高涨、供应不足	无	无	氨有毒性；有氮氧化物排放
改造成本	配套设施建设成本高	可用已有基础设施和现有船舶	改造投资较低	改进冷却系统和防火措施	改造难度极大	可利用现有氨供应链和基础设施

表 1 船用低碳动力比较（续）

Tab. 1 Comparison of Vessel Low Carbon Power (Continued)

动力燃料类型	LNG	甲醇	生物燃料	电	液氢	氨
燃料成本	低	低	高	较高	低	低
技术成熟度	高	较高	较高	较高	低	较低
适用场景	各类船型； 各类航行	高至 5 万吨级 货船； 各类航行	各类船型； 各类航行	中短距离航行	客轮； 中短途航	远途航行； 集装箱船等 大型船舶
适用阶段	过渡阶段	近中期阶段	过渡阶段	中远期阶段	中远期阶段	远期阶段

2.2 船舶动力节能提效

优化船舶推进系统的综合性能是保障远洋运输经济性和环境相容性的关键。在热力循环过程中，通过优化进排气相位与燃油雾化特性形成的均质可燃混合气，其燃烧释放的热能经活塞-曲轴机构转化为有效输出功。该能量转换过程伴随着不可避免的机械损失及氮氧化物、颗粒物等污染物的生成。其中，燃烧室内的湍流混合与化学反应动力学过程直接决定了能量转换效率，是影响发动机动力性、经济性和排放特性的决定性因素。

针对船舶动力新兴燃料与配套技术，日本在该领域的重点布局包括：1）加速推进双燃料内燃机开发，计划于2026年前完成传统燃料与氢/氨替代燃料

的双燃料内燃机试验，并将该技术率先应用于小型船舶，待技术成熟后，逐步推广应用至大型远洋船舶；2）积极推广LNG燃料及碳循环甲烷燃料的使用，配套制定针对性举措以攻克甲烷逃逸难题；3）升级改进船载CO<sub>2</sub>捕集系统，聚焦于提升CO<sub>2</sub>捕集效率、优化设备体积、压缩成本及降低能耗等维度，全方位塑造系统性能优势；4）着力增强电池能量密度，提高推进系统效率，延长大型远洋船舶续航时间。

基于当前发展战略，船舶动力的节能提效是核心点，目前已经较为成熟或正在研发的有关技术包括低转速长冲程设计技术、降低最大持续运转功率点油耗技术和气体燃料技术等<sup>[16-18]</sup>。绿色船舶动力节能提效技术进展梳理见表2<sup>[19]</sup>。

表 2 绿色船舶动力节能提效技术

Tab. 2 Energy Saving and Efficiency Improving Technology of Green Vessel Power

序号	技术名称	原理	技术是否成熟	应用情况
1	低转速长冲程设计技术	增加发动机冲程，优化燃烧过程，提高效率	V	适用于船舶主机和混合动力发动机
2	降低最大持续运转功率点油耗技术	优化发动机运行参数，降低燃油消耗率	V	用于船舶柴油机，提升经济性
3	部分负荷优化技术	优化设备在部分负荷下的运行参数，提高能效	III	适用于船舶主机、空调系统等
4	废气再循环技术（Exhaust Gas Recirculation, EGR）	将部分废气重新引入进气系统，降低燃烧温度，减少氮氧化物（NO <sub>x</sub> ）排放	IV	广泛用于船舶和汽车发动机
5	废气催化还原技术（Selective Catalytic Reduction SCR）	通过催化剂将废气中的氮氧化物还原为氮气和水蒸气	IV	用于船舶和汽车尾气后处理
6	气体燃料技术	使用天然气、液化石油气等气体燃料替代传统燃油，减少污染	IV	适用于船舶和汽车
7	尾气颗粒净化器和SO <sub>x</sub> 洗涤技术	过滤颗粒物，去除二氧化硫（SO <sub>2</sub> ）	V	用于船舶和工业废气处理
8	增压空气/缸内喷水	增压空气提高进气量，喷水或乳化油降低燃烧温度，提高效率	III	用于船舶和汽车发动机
9	混合/电力推进系统	结合燃油发动机和电动机，智能切换或协同工作	IV	用于船舶和电动汽车
12	太阳能和风能应用技术	利用太阳能和风能辅助动力	III	船舶上安装太阳能板和风帆



表 2 绿色船舶动力节能提效技术（续）

Tab. 2 Energy Saving and Efficiency Improving Technology of Green Vessel Power (Continued)

序号	技术名称	原理	技术是否成熟	应用情况
13	燃料电池技术	通过化学反应将氢气和氧气转化为电能，低排放	V	船舶和汽车领域
14	核能利用技术	利用核反应提供动力，能量密度高	V	大型船舶如核动力航母和破冰船

### 2.3 船舶总体优化

船舶全面优化设计主要聚焦于3个方面：

- 1) 通过船体线型优化和表面微结构减阻技术，有效降低航行阻。
- 2) 采用高效螺旋桨设计与主机-推进器协同控制策略，提升整体推进效能以及燃油利用效率。
- 3) 引入先进的新型材料，通过减轻船舶整体质量，进而降低其在运行过程中的能耗水平。

#### 2.3.1 船舶型线优化

尽管传统船型优化技术对于削减船体阻力的潜力有限，且不同船型的减阻效果差异悬殊，但人工智能与大数据技术的融合应用为船型优化开辟了新维度<sup>[20]</sup>。美国在汽车车身与零部件、飞机气动外形和螺旋桨等方向的智能化设计方法已取得突出成就，该方法既加快了设计速度，又大幅增强了产品性能。在船体线型设计领域，美国、日本、韩国和欧洲等国家及地区也已着手构建船型样本的流体性能数据库，开发集成仿真数据挖掘、专家知识图谱和生成对抗网络的三维型线智能设计平台，并以此为基础探索了人工智能辅助船型设计的应用。

#### 2.3.2 推进系统优化

随着数值仿真模拟和拓扑结构优化等前沿技术的不断进步，船舶推进装置的创新迎来了新机遇。如，美国Sharrow Engineering公司研发的仿生螺旋桨，其采用非对称叶型拓扑结构，通过消除叶尖涡流和延迟空泡，将推进效率提升区间扩展至9%~15%，显著降低了能量损失<sup>[21-22]</sup>。此外，随着智能通信技

术和船机技术的持续发展，船舶推进系统不仅实现了硬件层面的效率提升，还通过与智能管控系统的配合，进一步缩减了能耗并增加了使用寿命。

#### 2.3.3 新材料应用

随着新材料以及3D打印、合金激光焊接等先进加工技术的不断发展，碳纤维、高强合金等新型材料在船舶建造领域的应用逐渐增多<sup>[23]</sup>。然而，受限于现阶段的条件，虽然碳纤维材料具有更轻的质量和更优的性能，但由于高昂的原材料制备、加工成本，使得其在造船市场的广泛应用仍面临挑战，目前主要应用于核心配件及小型船艇。相比之下，高强合金因具备高强度和轻质量的特点，在大型船艇领域具有更大的应用潜力，特别是在大型客滚船、大型渡船等上部结构较高的船型中，采用合金能够更好地控制船体重心与质量。

## 3 船舶排放“碳中和”路线分析

IMO长期将航运业的温室气体减排作为核心工作方向，并将控制船舶碳排放纳入关键管理举措。2018年，该组织出台了《船舶温室气体减排初步战略》，从愿景规划、减排目标、实施准则、阶段性措施及潜在影响等维度，系统制定了航运业适应气候变化的指导框架<sup>[8]</sup>。本文基于IMO减排目标，并参考国际内燃机协会（Conseil International des Machines à Combustion, CIMAC）发布的白皮书，整合归纳了船舶“碳中和”实施路径，见图2。

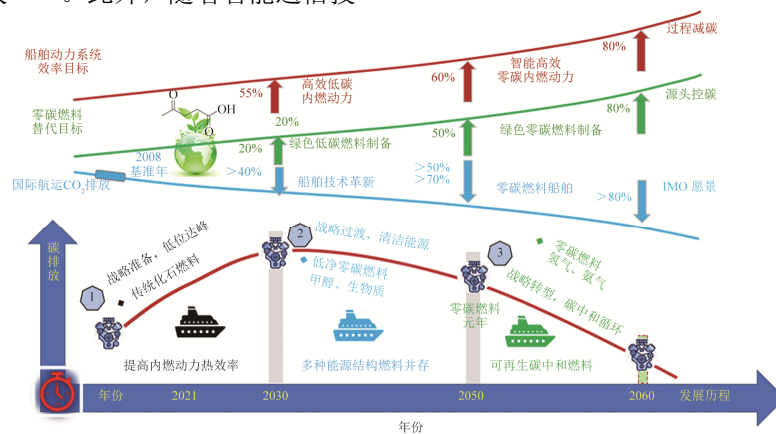


图 2 船舶排放“碳中和”路线示意图

Fig. 2 Diagram of Carbon Neutral Route for Vessel

船舶“碳中和”实施路径可系统划分为过程减碳与源头控碳等2个维度。在过程减碳方面，主要涵盖船舶低碳化制造（优化材料与生产工艺）、高效动力系统设计（提升能源转换效率）和低碳航运运营管理（航线优化与能效监控）。源头控碳主要聚焦于绿色燃料替代（甲醇、氢、氨等零碳/低碳燃料的规模化应用）和碳捕集的整合，实现CO<sub>2</sub>资源化循环。基于技术成熟度与实施难度，船舶“碳中和”可分为3个阶段循序推进：

1) 战略准备阶段（当前至2030年）。航运业低碳转型将以提升船舶内燃机热效率为核心突破口。虽然传统化石燃料仍将保持主导地位，但绿色低碳燃料（包括FAME/HVO、甲醇和绿氨等）的渗透率预计达到18%~22%。通过技术创新，船舶内燃机热效率有望突破55%，推动航运业碳排放进入低位达峰阶段，实现单位运输功CO<sub>2</sub>排放量较2008年降低40%的目标。

2) 战略过渡阶段（2030—2050年）。航运能源体系将呈现多元燃料协同发展的新格局，形成以传统化石燃料为基础过渡、低碳燃料（LNG/甲醇）为中继桥梁、零碳燃料（绿氨/绿氢）为终极目标的梯度替代路径。随着低/近零碳燃料应用范围的扩大和船舶动力系统效率的提升，预计到2050年将成为船舶零碳燃料元年，低碳燃料船舶动力系统热效率将达到60%，航运业年度温室气体总排放量较2008年下降50%。

3) 战略转型阶段（2050—2060年）。随着绿色零碳燃料制备技术的重大突破和新型燃烧技术与自适应控制策略的协同优化，零碳燃料动力系统的效率将达到80%，零碳燃料在船舶能源结构中的占比提升至80%。届时，航运业单位运输活动CO<sub>2</sub>排放量和年度温室气体总排放量将较2008年同步降低80%。在船载碳捕集与封存技术的辅助下，在21世纪末实现航运温室气体净零排放的终极目标。

### 3.1 过程减碳

#### 3.1.1 船舶内燃动力效率提升

当前，全球船用内燃机技术发展呈现区域差异化特征，欧洲在传统船用发动机研发与应用方面保持领先优势，但在零碳燃料动力系统研究领域尚未形成明显技术壁垒。除欧洲外，其他主要航运国家在“碳中和”船舶发动机研发方面仍处于技术积累的初级阶段。从能量转换原理来看，船用发动机本质上是通过燃料燃烧实现化学能-热能-机械能的连续转化过程。在零碳燃料发动机研发中，燃烧效率优化和排放控制构成了技术突破的关键瓶颈，这直接决定了整个动力系统的开发路径。

具体而言，燃烧技术创新在发动机研发过程中具有基础性和先导性地位，其他子系统都需要围绕

燃烧系统的技术要求进行协同设计。以LNG、甲醇和氨气为代表的低/零碳燃料由于自燃温度较高、着火特性较差，在船舶发动机应用中面临显著的技术挑战。为解决这一难题，目前主要采用高活性氢气引燃和开发新型燃烧模式2种技术路线。这些解决方案涉及燃料雾化混合机理、清洁燃烧过程调控以及控制策略优化等一系列关键技术难题。在此背景下，发展稳定可控的低温燃烧技术已成为船舶动力系统升级的重要方向。其中，预燃室射流引燃技术<sup>[24-26]</sup>因其在改善燃烧稳定性方面的突出优势，已成为行业的重点攻关领域。

随着内燃机技术的持续革新和燃烧理论的不完善，现代内燃机的能量转化效率较早期产品已实现质的飞跃。在特定运行工况下，部分先进机型的热效率已突破50%的技术门槛。然而，这远未触及内燃机效率的理论极限，现有主流机型仍存在巨大的效率提升潜力。随着新型技术的涌现、研究方法的革新以及热力学循环理论的深化发展，这些潜力将逐步转化为实际效益。2010年，在美国汽车研究理事会（United States Council for Automotive Research, USCAR）的组织下，国际权威专家通过系统评估全球内燃机领域的基础研究成果和技术发展历程，对热效率的发展前景做出了科学研判：在近期可实现60%的热效率目标，而中长期则有望达到85%的突破性水平<sup>[27]</sup>。高热效率不仅意味着更优异的燃油经济性，更能显著降低CO<sub>2</sub>排放强度。要实现船舶内燃机60%以上的热效率目标，必须进行革命性技术创新，主要包括：采用复合循环系统、开发新型发动机架构、实施更精确控制的燃烧模式。这一技术革新虽然需要长期积累，但相关研究工作必须立即启动。基于战略发展角度，最有效的效率提升途径为发动机结构创新与复合循环技术的协同应用，具体包括：前置循环优化、燃料电池混合动力系统集成和底循环能量回收利用等关键技术<sup>[27]</sup>。这种多技术融合的发展路线代表了未来船舶动力系统的重要发展方向。

#### 3.1.2 船舶整体能效优化提升

现代信息技术的快速发展为船舶动力系统智能化带来了革命性变革，特别是人工智能算法与高性能计算的深度融合，显著提升了航运系统的能效管理水平。新型船舶能效优化平台通过整合物联网感知网络、边缘计算架构和智能决策算法，构建了覆盖全船设备的实时监控体系，该系统采用分布式光纤传感技术，能够以毫米级精度持续采集主推进系统、电力网络和热交换装置的关键运行参数。在环保性能方面，该平台通过多目标优化算法将CO<sub>2</sub>排放强度精确控制在现有船舶能效指数（Energy Efficiency Existing ship Index, EEXI）限值范围内，

还能显著降低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_x$ 等污染物的排放。此外，基于港口-船舶协同优化模型，系统能够综合考量航线特征、海况条件和气象因素等多元变量，通过深度学习算法对最优航速和路径进行实时动态分析，有效减小船舶航行阻力并优化主机运行工况。该先进系统融合了大数据分析和智能决策，通过持续优化船舶整体能效表现，为航运业绿色转型提供了关键技术支撑。船舶能效优化结构示意图3。

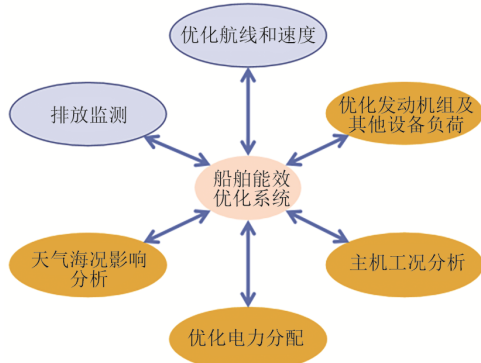


图3 船舶能效优化结构示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Vessel Energy Efficiency Optimization Structure

### 3.2 源头控碳

#### 3.2.1 近零碳排放燃料

“碳中和”燃料是指采用清洁能源（如太阳能、风能等）驱动电解水制氢，或通过甲烷重整工艺制备的氢能，再结合从大气碳捕集系统或生物质资源中获取的碳源合成的碳基燃料。这类燃料也可直接由生物质原料经过生物发酵、热解气化等转化工艺生产<sup>[28-29]</sup>。这类燃料的特殊性在于其碳元素来自自然界循环体系，在燃料使用阶段释放的 $\text{CO}_2$ 相当于先前环境中固定的量，从而实现全生命周期内的碳净零排放。

#### 1) LNG

LNG作为船用过渡燃料展现出显著的减排优势，其单位热值碳排放量较传统船用重油降低10%~23%，因而被航运界公认为最具实用价值的清洁过渡能源<sup>[30]</sup>。自2000年挪威MRF航运公司开发的全球首艘LNG动力渡轮Glutra号成功投运以来，LNG作为船用燃料的应用便呈现出了快速发展的态势。目前为止，全球已投入运营的LNG动力船舶已达626艘，覆盖了集装箱船、邮轮和滚装船等18个细分船型。

全球航运业正加速构建LNG燃料补给网络，以支持船舶能源转型<sup>[31]</sup>。欧盟通过《替代燃料基础设施指令》，强制要求各成员国须确保境内至少设有1座具备LNG加注功能的港口。2015—2024年，全球具备LNG加注能力的港口数量呈现快速攀升的态势，由最初的20座迅速增长至191座。在LNG加注船方面，2017年仅有4艘运营、1艘在建；而到2024年，运营数量已达64艘，在建的为16艘。其中，沪东中华造船（集团）有限公司建造的1.86万 $\text{m}^3$ 的Gas Agility号，是目前全球在役的最大型LNG加注船。

船用LNG燃料消费量呈现加速增长态势。2024年，LNG用作海运燃料达到70亿 $\text{m}^3$ ，较2020年增长3倍。IMO在2020年实施的关于硫排放限制的规定是导致LNG需求快速增长的主要原因。LNG动力船舶（不包括LNG运输船）在2020—2024年间增长了160%<sup>[32]</sup>。然而，LNG燃料的甲烷逃逸问题使其难以完全满足IMO提出的中长期温室气体减排的目标要求，其在航运领域的长期可持续发展前景仍存在不确定性。

#### 2) 合成甲醇

甲醇合成是一种已知的、全球通用的工业过程，包括合成气生产、粗甲醇生产和调质等3个主要步骤<sup>[33-34]</sup>。绿色甲醇合成工艺原理见图4。

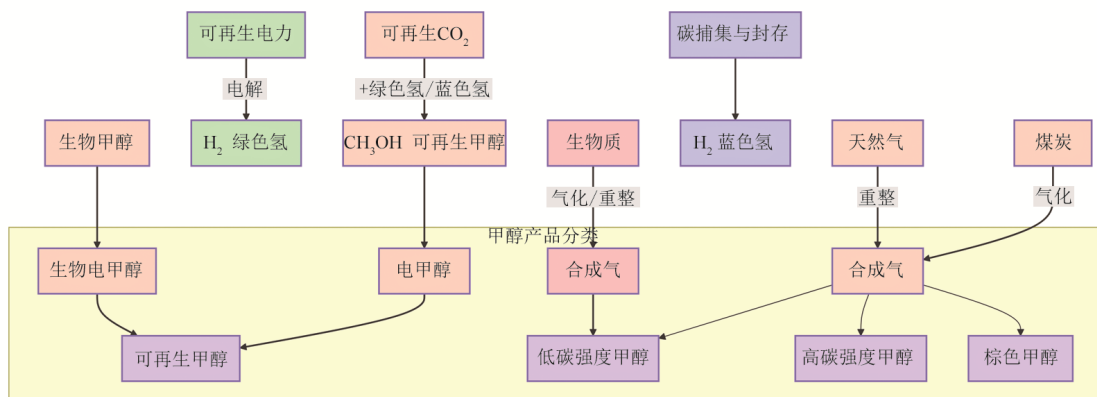


图4 绿色甲醇合成工艺原理图

Fig. 4 Green Methanol Synthesis Process Schematic Diagram

与传统船用燃料相比, 甲醇燃料可减少 6%~10%的碳排放, 其储存无须低温条件且发动机改造成本较低, 综合成本优势明显, 被视为具有大规模应用前景的替代燃料。Stena Line 公司生产的全球首艘甲醇动力船 Stena Germanica 号渡轮于 2015 年 3 月投入运营, 执行德国基尔至瑞典哥德堡航线运输任务。2018 年 IMO 将甲醇燃料技术列为重点发展项目, 通过《甲醇/乙醇燃料船舶安全临时导则》和《低闪点燃料技术规则》, 为甲醇燃料的运输和使用扫清了技术障碍。2019 年 Methanex 集团旗下 Waterfront 航运公司投放了 4 艘甲醇动力远洋船舶。目前, MAN 公司和瓦锡兰公司已成功开发并运行十余艘甲醇双燃料船舶, 全球现有 14 艘甲醇燃料船投入运营并有 14 艘在建订单, 其中 Waterfront 公司运营 11 艘甲醇远洋油船并订购了 8 艘 5 万载重吨甲醇双燃料船<sup>[35]</sup>。瑞典 Proman Stena 公司向中国广船国际股份有限公司订购了 1 艘 5 万吨级甲醇双燃料油轮并已交付, 这表明甲醇燃料已成为船舶减排的重要技术路线之一。

### 3.2.2 零碳排放燃料

零碳燃料是指在生产、运输、储存及使用等全生命周期中实现CO<sub>2</sub>净零排放的清洁能源。这类燃料主要通过可再生能源(如风电、水电和光伏等)发电进行电解水制氢, 其氢气可直接用作燃料或进一步合成氨等衍生燃料, 是构建可持续能源体系、达成“碳中和”战略目标的关键技术路径<sup>[36-37]</sup>。

#### 1) 氢燃料

氢能作为零碳船舶燃料的研发应用已进入快速发展阶段。当前制氢技术呈现多元化发展路径, 根据其碳排放特征分为灰氢、蓝氢和绿氢等3种路径。灰氢主要通过化石燃料(如天然气)的蒸汽甲烷重整或部分氧化等方法制备, 生产过程会释放大量的CO<sub>2</sub>, 属于高碳排放的制氢方式。蓝氢的制备过程与灰氢类似, 但在生产过程中引入了碳捕集、利用与封存技术, 从而大幅减少了CO<sub>2</sub>排放, 是一种低碳的过渡性清洁能源。绿氢则是通过可再生能源(如太阳能、风能和水能等)发电进行电解水制备的, 整个过程几乎不产生CO<sub>2</sub>, 是最可持续的制氢方式。目前灰氢仍占据主导地位, 其生产过程存在显著的碳排放问题。行业转型重点正逐步转向绿氢, 特别是海上风电耦合电解槽技术已成为最具潜力的零碳制氢方案<sup>[38-39]</sup>。碱性电解槽是目前应用最广泛的电解水制氢技术, 其效率约为70%。质子交换膜电解槽具有更高的效率和更快的动态响应能力, 适合与可再生能源的波动性匹配, 其效率已突破80%, 能够适应秒级的负荷变化。固体氧化物电解槽则利用工业废热, 效率可达88%, 耐久性提升至2万 h。随着技术的不断进步, 电解槽的效率和性能将进一步

提升, 成本也将逐步降低, 这同时将推动绿氢的大规模应用。

在技术研发方面, 欧美国家凭借先发优势, 已在经济型制氢技术和氢动力船舶工程化应用方面取得突破性进展<sup>[36]</sup>。美国于2021年正式投入运营了首艘氢燃料电池船。日本则聚焦氢能动力系统创新, 由川崎重工业株式会社、洋马公司和日本发动机公司联合开发的船用低速二冲程氢燃料发动机已完成台架试验, 并于2024年进行了岸上验证测试。韩国则重点突破高压储氢技术和大型液氢储运装备。我国在该领域也取得重要突破, 率先发布了具有完全自主知识产权的氢燃料试验船舶技术方案, 创新性地整合了可再生能源制氢、高压储氢和燃料电池推进系统。

当前, 氢燃料储运与补给技术领域已实现重大技术突破, 为航运业氢能应用提供了关键基础设施支持。2019年, 川崎重工业株式会社成功研发并交付了全球首制的1 250 m<sup>3</sup>液态氢运输船。挪威国家石油公司联合多方共同开发完成了9 000 m<sup>3</sup>级大型液态氢加注船的概念设计。现代重工业株式会社研发的20 000 m<sup>3</sup>超大型液态氢运输船技术方案, 已获得韩国船级社等权威机构颁发的原则性认可证书。2021年4月, 比利时CMB集团投建的安特卫普港船舶加氢站正式开启商业运行, 成为全球首个为船舶提供氢能加注服务的站点<sup>[41]</sup>。

氢能与燃料电池技术的协同发展已成为全球能源体系变革和动力系统升级的关键战略路径, 这一创新组合为应对能源危机和环境挑战提供了突破性解决方案。氢燃料电池在船舶领域应用广泛, 不仅能作为船舶的推进动力, 还能充当船舶的电源。从渡船、供给船到巡逻船, 从货运船到观光船, 都可搭载氢燃料电池, 为其提供动力和电力支持。相较于传统动力方案, 该技术具有三大核心优势: 1) 能量转换效率显著提升; 2) 实现真正的零排放运行; 3) 大幅降低噪声污染<sup>[42-43]</sup>, 使其备受世界各国及各大船舶企业的关注, 有望成为未来动力源的有力候选之一。而基于电池储能的混合动力系统则是一种在能量密度受限的情况下, 仍能实现较好减排效果的折中解决方案。

在全球对船舶绿色转型的要求愈发严格之际, 各国正加速推进各类节能降碳技术的研发与应用。氢燃料凭借其清洁、高效等特性, 被视为航运业减排的关键技术之一, 但其规模化应用仍面临诸多的限制。船舶氢燃料技术的发展、对应规范标准的完善以及配套基础设施的建设, 仍需投入大量资源与精力。

#### 2) 氨燃料

氨是化肥工业的重要原料, 主要通过氢气和氮



气合成制得, 其中氢气大多来源于化石能源, 而氮气则是通过空气分离获取。在船舶动力应用领域, 氨燃料面临着若干关键技术挑战: 1) 其燃烧特性表现为火焰传播速率较慢且可燃范围相对狭窄; 2) 燃烧过程中会产生氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等污染物<sup>[44-45]</sup>。此外, 氨是毒性气体且带有刺激性

气味, 这对船用燃料系统的安全防护提出了严格要求, 但当下仍缺少统一规范。目前, 航运业正重点推进3个方面的研发工作: 1) 氨燃料内燃机的性能优化; 2) 氨燃料电池系统的开发; 3) 专用氨燃料船舶的设计。图5为绿色零碳排放的氨气生产过程及应用场景。

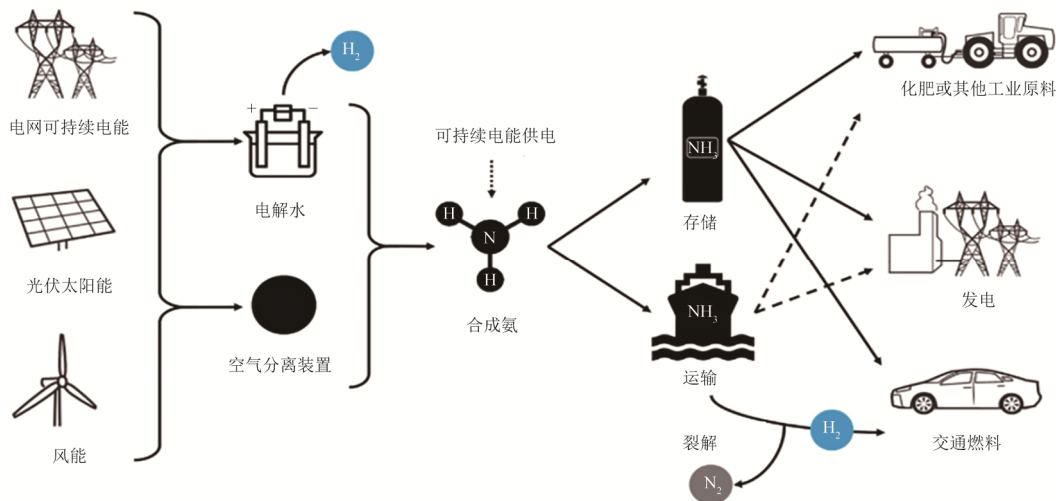


图5 无碳氨生产路线图及其各种用途

Fig. 5 Carbon-Free Ammonia Production Roadmap and Its Various End-Use

相较于液氢（ $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），液氨（ $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）在储存和供应方面更具便利性，液氨的能量密度大约是液氢的1.5倍，因此，液氨更适合作为海上运输氢能的一种载体<sup>[46-47]</sup>。氨燃料船舶技术正处于从实验室研发向工程化应用过渡的关键阶段，全球主要航运国家正积极开展相关研究。欧洲企业主导氨燃料发动机开发，其中瓦锡兰于2023年11月推出了航运业首个商用四冲程氨燃料发动机解决方案。欧盟通过“地平线2020”项目资助了2 MW氨燃料电池项目，目前已经在Viking Energy号海工船完成搭载。日本政府通过50%的研发补贴政策推动全产业链布局，在2021年专门成立氨燃料委员会并制定零排放船舶发展路线图。我国也在该领域取得系列突破，上海船舶研究设计院研发的18万t氨动力散货船获得英国劳氏船级社（Lloyd's Register of Shipping, LR）的原则性认可（Approval in Principle, AIP）证书，大船集团开发的“C-Future”液氨动力集装箱船也获得AIP证书，江苏新时代造船有限公司与希腊Avin International签约全球首艘氨预留苏伊士型油轮。当前，氨燃料产业链面临的主要挑战在于绿氨制备技术的突破。传统哈伯法合成氨工艺每年产生约0.5 Gt  $\text{CO}_2$ 排放（占全球总量1.8%），其中80%以上的碳排放来自制氢环节<sup>[48-49]</sup>。因此，发展基于可再生能源的绿氨生产技术，特别是突破电解水制氢耦合氮气合成氨的工艺路线，将成为氨燃料全生命周期零

碳排放的关键所在。

#### 4 船舶排放“碳中和”政策分析

IMO的环境、治理指标以及新兴强制性标准，包括碳强度指标（Carbon Intensity Indicator, CII）、EEXI、年度效率比（Annual Efficiency Ratio, AER）和能效运营指数（Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI）等<sup>[50]</sup>，将推动海运业的“环境、社会与治理”转型朝着脱碳目标迈进。

IMO最新法规要求400 t及以上船舶必须满足双重能效标准：1) 达到现有EEXI技术门槛；2) 维持年度运营CII合规评级。这两项关键指标通过不同维度推动行业减排：EEXI侧重船舶设计能效基准，强制淘汰高耗能船型；CII则动态评估船舶运营能效表现，采用A~E的5级评级体系（每载重吨和每航行海里排放的 $\text{CO}_2$ 量）。Scope对全球4万余艘船舶的卫星监测数据结果显示，当前能效表现呈现两极分化：18.8%的船舶位列最优A级，23.7%处于中间C级，而面临合规压力的D级（13.9%）和E级（21.8%）船舶合计占比超过1/3<sup>[51]</sup>。新规实施后，所有CII评级欠佳的船舶必须提交详细的能效提升计划。连续3年维持D级或单年度被评为E级的船舶将被强制要求执行整改方案，包括但不限于实施节能技术改造、优化运营模式或改用低碳燃料等措施。

IMO的行动正在加速航运业的数据披露进程，

从而显著提升船舶在环境绩效、可持续性以及安全性方面的透明度。欧盟海事局提出了绿色海洋空间监管提案,作为欧盟“Fit for 55 Package”一揽子应对气候变化提案的重要组成部分。该提案着重强调了可再生和低碳燃料在航运业的应用,旨在推动行业向绿色低碳转型。此外,航运业还将被纳入欧盟能源交易体系,根据最新立法进展<sup>[52]</sup>,航运业的碳配额分配机制主要通过拍卖实现,欧洲能源交易所为官方拍卖平台,2024年新增海运碳配额7 840万个。航运公司需为其船舶开设碳配额账户,并通过现货、期货市场或场外交易获取配额。过渡期安排为:2024年需提交40%的经验证排放量配额,2025年为70%,2026年起达到100%。责任主体包括船舶所有者、管理者或租船人等。未来,温室气体排放范围将从CO<sub>2</sub>扩展到甲烷和氧化亚氮,船舶吨位范围也可能从2026年起扩展至400 Gt~5 000 Gt,这些举措有利于进一步强化其减排责任。除欧盟外,全球范围内包括中国、美国、英国在内的众多国家和地区,都在积极构建不断增长且相互平行的碳配额分配监管和标准制定框架。这些框架的建立,不仅为航运业的可持续发展提供了明确方向,也为应对全球气候变化注入了新动力。

船舶全生命周期各阶段(建造、运营和拆解)均会产生显著环境负荷,对生态环境造成诸多影响,而在船舶整体绿色性能中,其动力系统的绿色性能起到关键作用,因此亟需建立一种新的全生命周期

评价系统和方法<sup>[53-54]</sup>。从气候效应评估维度考量,燃料全生命周期碳足迹分析比单一工艺环节的能效评估更具科学价值,能更准确地反映燃料的真实气候影响。未来船舶燃料的全生命周期碳排放水平取决于3个重要因素:1)作为基础核心的氢气来源;2)燃料是否加碳;3)燃料制备过程中所消耗能源的来源构成<sup>[55]</sup>。需要特别注意的是,若技术路线选择不当或能源结构配置失衡,在制备和使用零碳燃料的过程中,船舶全生命周期内的碳排放强度可能反而超过传统化石燃料<sup>[56]</sup>。

实现燃料“碳中和”目标的关键在于提升可再生能源在电力/能源体系结构中的比重。然而,仅依靠可再生能源电网供应,难以满足大规模零碳燃料生产的需求。因此,鉴于当前电网能源构成较为复杂,有必要运用全生命周期碳排放分析方法展开科学评估。截至目前,IMO的各项法规依旧采用“油箱到尾流”(Tank-to-Wake)的评价方式,见图6。围绕如何运用Well-to-Wake的全生命周期分析方法对替代燃料进行评估的研究已经展开<sup>[57-58]</sup>。以“油井至尾流”船舶燃料全生命周期为核心需求,需探究构建既创新又实用的方案。与此同时,要搭建包含资源环境层、生命周期层、需求层、方案层以及生态层的船舶创新生态系统运行机制。倡导构建生态共建、资源共享、系统共生、互利共赢的船舶创新生态系统。

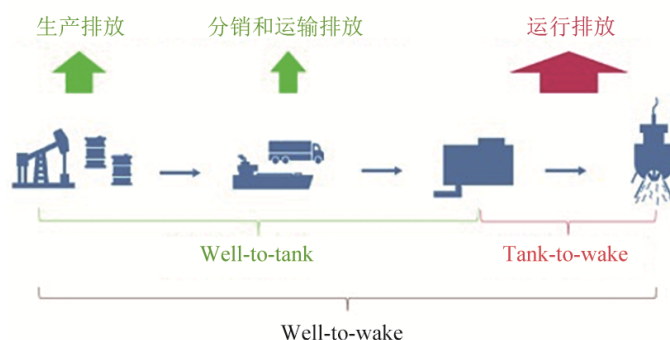


图6 油井到尾流的全生命周期示意图

Fig. 6 Diagram of the Life Cycle From Oil Well-to-Wake

## 5 结论

结合IMO航运CO<sub>2</sub>减排目标,基于技术成熟度与实施难度,船舶“碳中和”路线包含过程减碳和源头控碳2个维度,可分为战略准备、战略过渡和战略转型3个阶段循序推进。船舶动力系统节能提效是过程减碳的核心点,绿色低碳/零碳燃料在船舶燃料中的替代是源头控碳的关键。

大力推动风能、太阳能和水能等可再生能源用于制备基于氢气的零碳排放燃料,并逐步削减化石燃料使用量,是达成船舶航运行业温室气体减排目

标的必由之路。在短期内,运用蒸汽甲烷重整结合碳捕集等技术来制备净零碳燃料,能够迅速减少碳排放。而生物质燃料因受到环境可持续发展等因素制约,其潜在发展规模相对有限,在船舶能源转型的过渡阶段可以发挥一定的补充作用。

海运行业的燃料与动力装置类型会因航运类型的不同而呈现出多样化态势。内燃机的燃料适应性强、能效高、技术成熟和可靠性高,但热效率提升仍有巨大潜力。通过技术改进,船舶内燃机热效率有望在近期实现至60%。远洋运输对动力系统可靠



性要求极高, 内燃机的主导地位有望继续保持。与此同时, 电驱动、混合动力以及燃料电池等技术将作为重要补充, 在近海和内陆航运领域发挥积极的作用。

为确保进入海事运输领域的燃料能够真正降低温室气体的排放强度, 需要采用船舶燃料全生命周期的科学评价体系。目前大多数国家和地区, 采用电网能源电解水制氢路线所产生的CO<sub>2</sub>排放量比使用柴油驱动船舶的排放量更高。因此, 实现燃料“碳中和”目标的关键在于提升可再生能源在电力/能源体系结构中的比重, 或者根据各地的实际情况, 发展区域性的集中生产模式。

### 参考文献:

- [1] HERO M, VIDMAR P, VLAČIĆ P, et al. Limiting Greenhouse Gas Emissions in the Maritime Transport Sector[J]. *Transportation Research Procedia*, 2025, 83: 157-164.
- [2] SHI X. New Rules and Implications for Ship Energy Efficiency[J]. *China Ship Survey*, 2021(2): 16-19.
- [3] 李洋钢, 应业炬, 郁惠民. LNG 运输及加注型船舶研究发现状与进展[J]. *中国水运*, 2021(15): 100-103.  
LI Y G, YING Y J, YU H M. Present Situation and Progress of Research and Development of LNG Transportation and Refueling Ships[J]. *China Water Transport*, 2021(15): 100-103.
- [4] 王凡, 李丹丹, 陈梅涛, 等. 我国氢能产业发展形势分析[J]. *石油石化绿色低碳*, 2024, 9(6): 10-15.  
WANG F, LI D D, CHEN M T, et al. Analysis of the Development Situation of Hydrogen Energy Industry in China[J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2024, 9(6): 10-15.
- [5] 叶无极. 绿色燃料, 驱动全球航运业加速脱碳[J]. *风能*, 2024(10): 49-56.  
YE W J. Green Fuel Drives the Global Shipping Industry to Accelerate Decarbonization[J]. *Wind Energy*, 2024(10): 49-56.
- [6] DENG X, XIE J, TENG F. What is Carbon Neutrality?[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(1): 107-111.
- [7] CIMAC. Importance of a Well-to-Wake Approach: White Paper 4[R]. 2020.
- [8] International Maritime Organization. The International Maritime Organization's Initial Greenhouse Gas Strategy[S]. 2018.
- [9] 黄有方, 魏明晖, 王煜, 等. “双碳”目标导向下我国绿色航运物流发展现状与趋势[J]. *大连海事大学学报*, 2019, 49(1): 1-16.  
HUANG Y F, WEI M H, WANG Y, et al. Development Status and Trend of Green Shipping Logistics in China Under the Guidance of "Dual Carbon" Goal[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2019, 49(1): 1-16.
- [10] 陈清泉, 高金燕, 何璇, 等. 新能源汽车发展意义及技术路线研究[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(1): 68-73.  
CHEN Q Q, GAO J Y, HE X, et al. Research on the Significance of Developing New Energy Vehicles Industry and Its Technical Routes[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(1): 68-73.
- [11] 周晶磊, 夏鸿文, 任超伟. 均质压燃在内燃机燃烧技术中的应用[J]. *交通节能与环保*, 2013, 9(4): 46-49.  
ZHOU J L, XIA H W, REN C W. Application of Homogeneous Compression Combustion in Combustion Technology of Internal Combustion Engine[J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2013, 9(4): 46-49.
- [12] 李娜, 张卓缘. 绿色甲醇燃料的船用分析与展望[J]. *中国水运*, 2023(9): 61-63.  
LI N, ZHANG Z Y. Marine Analysis and Prospect of Green Methanol Fuel[J]. *China Water Transport*, 2023(9): 61-63.
- [13] 牛勇超, 程彦森, 李桑莞, 等. 浅谈燃料电池在船艇领域的应用进展[J]. *中国设备工程*, 2024(14): 223-225.  
NIU Y C, CHENG Y S, LI S W, et al. Application Progress of Fuel Cell in the Field of Boats and Boats[J]. *China Plant Engineering*, 2024(14): 223-225.
- [14] 刘建国, 戢时雨, 朱跃中. 水运行业“去油化”趋势及中国低碳化路径选择[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(7): 45-51.  
LIU J G, JI S Y, ZHU Y Z. Water Transport "De-Oiling" Trend and China's Low-Carbon Path Selection[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(7): 45-51.
- [15] KORBERG A D, BRYNOLF S, GRAHN M, et al. Techno-Economic Assessment of Advanced Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Ships[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 142: 110861.
- [16] REN H L, DING Y, SUI C B. Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship-Engine-Propeller Matching[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(12): 425.
- [17] MARQUES C H, CAPRACE J D, BELCHIOR C R P, et al. An Approach for Predicting the Specific Fuel Consumption of Dual-Fuel Two-Stroke Marine Engines[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(2): 20.

- [18] WANG S Y, NOTTEBOOM T. The Adoption of Liquefied Natural Gas as a Ship Fuel: a Systematic Review of Perspectives and Challenges[J]. *Transport Reviews*, 2014, 34(6): 749-774.
- [19] ZHANG X, ZHAO F, WANG C, et al. Research on the Development Strategy of Green Ship Technology[J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2016, 18(2): 66-71.
- [20] PERCIVAL S, HENDRIX D, NOBLESSE F. Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms[J]. *Applied Ocean Research*, 2001, 23(6): 337-355.
- [21] FRANGOPOULOS C A. Developments, Trends, and Challenges in Optimization of Ship Energy Systems[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4639.
- [22] 杨飞. 汽车机械控制系统中自动化技术的应用[J]. *内燃机与配件*, 2021(7): 205-206.
- YANG F. Application of Automation Technology in Automobile Mechanical Control System[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2021(7): 205-206.
- [23] MOURITZ A P, GELLERT E, BURCHILL P, et al. Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines[J]. *Composite Structures*, 2001, 53(1): 21-42.
- [24] AN Y Z, ZHANG Y H, ZHU W, et al. Study of the Inherent Trade-Off Between Jet Ignition and Energy Conversion in Methanol Active Pre-Chamber[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 112: 277-288.
- [25] ZHAO D Y, AN Y Z, PEI Y Q, et al. Optical Study on Spray Mixing, Flame Propagation and Jets Evolution within Visible Methanol Active Pre-Chamber for Turbulent Jet Ignition[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 319: 118952.
- [26] HU J N, PEI Y Q, AN Y Z, et al. Study of Active Pre-Chamber Jet Flames Based on the Synergy of Airflow with Different Nozzle Swirl Angle[J]. *Energy*, 2023, 282: 128198.
- [27] 裴升东. 内燃机活塞优化设计及分析[J]. *机械研究与应用*, 2011, 24(1): 69-70.
- QIU S D. Optimal Design Analysis on Piston of Internal Combustion Engine[J]. *Mechanical Research & Application*, 2011, 24(1): 69-70.
- [28] 马达夫, 温霄璿, 闻哲, 等. 生物质制取绿色甲醇技术及经济性分析[J]. *现代化工*, 2025, 45(1): 250-255.
- MA D F, WEN X J, WEN Z, et al. Technology and Economic Analysis on Green Methanol Production from Biomass[J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(1): 250-255.
- [29] 马义平, 范昭瑜. 双碳背景下甲醇燃料船舶应用现状[J]. *航海技术*, 2024(6): 61-66.
- MA Y P, FAN Z Y. Current Status of Methanol Fueled Ship Applications in the Dual Carbon Context[J]. *Marine Technology*, 2024(6): 61-66.
- [30] 王健, 王艳国, 滕文卿, 等. 船用氨燃料系统建模仿真及其控制器测试[J]. *上海船舶运输科学研究所学报*, 2024, 47(6): 20-28.
- WANG J, WANG Y G, TENG W Q, et al. Modeling and Simulation of Marine Ammonia Fuel System and Test of Its Controller[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2024, 47(6): 20-28.
- [31] 张亚蓓, 杨亚兰, 葛帆. 推进国内船舶低(零)碳发展以新质生产力擦亮航运绿色底色[N]. *中国水运报*, 2024-07-12(001).
- ZHANG Y B, YANG Y L, GE F. Promote the Low (Zero) Carbon Development of Domestic Ships to Polish the Green Background of Shipping with New Quality Productivity[N]. *China Water Transport News*, 2024-07-12(001).
- [32] IEA. Gas Market Report[R]. 2021.
- [33] LIU C T, LI Z Q, PEI Y Q, et al. Methanol as a Fuel for Internal Combustion Engines[M]. Singapore: Springer Singapore, Engines and Fuels for Future Transport, 2021.
- [34] 李博, 孙昊, 陈衡, 等. 基于生物质气化的绿色甲醇制备系统性能分析[J]. *现代化工*, 2025, 45(1): 232-238.
- LI B, SUN H, CHEN H, et al. Performance Analysis on Biomass Gasification-Based Green Methanol Production System[J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(1): 232-238.
- [35] ZHENG L J, ZHU Q Y, XIAN N Y. Status Quo and Prospect of Marine Fuel Market at Home and Abroad[J]. *International Petroleum Economics*, 2018, 26(5): 65-72.
- [36] WANG Z, LI M Y, ZHAO F, et al. Status and Prospects in Technical Standards of Hydrogen-Powered Ships for Advancing Maritime Zero-Carbon Transformation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 62: 925-946.
- [37] SHI J, ZHU Y, FENG Y, et al. A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in Marine Engines[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(3): 584.
- [38] AKDAĞ O. The Operation and Applicability to Hydrogen Fuel Technology of Green Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Offshore Wind

- Power[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425: 138863.
- [39] RAMAKRISHNAN S, DELPISHEH M, CONVERY C, et al. Offshore Green Hydrogen Production from Wind Energy: Critical Review and Perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 195: 114320.
- [40] ZHAO Y Y. Latest Development of Global Zero-Emission Ship Research and Development[J]. China Ship Survey, 2021, 258(10): 64-67.
- [41] SÜRER M G, ARAT H T. Advancements and Current Technologies on Hydrogen Fuel Cell Applications for Marine Vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(45): 19865-19875.
- [42] MANOHARAN Y, HOSSEINI S E, BUTLER B, et al. Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2296.
- [43] PEI Y Q, HU Z C, AN Y Z, et al. Numerical Study on H<sub>2</sub> Active Pre-Chamber Nozzle Structure to Enhance Efficiency of a Large-Bore NH<sub>3</sub> Engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 112: 266-276.
- [44] HU Z C, AN Y Z, PEI Y Q, et al. Study of Activity Stratification-Controlled NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> Combustion in a Large-Bore Gas Engine Utilizing Split-Channel Supercharge and Fuel-Air Mixing Technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 92: 59-68.
- [45] KUMAR L, SLEITI A K. Systematic Review on Ammonia as a Sustainable Fuel for Combustion[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 202: 114699.
- [46] ASMARE M, ILBAS M. Direct Ammonia Fueled Solid Oxide Fuel Cells: A Comprehensive Review on Challenges, Opportunities and Future Outlooks[J]. International Journal of Energy Technology, 2020: 70-91.
- [47] CIMAC. White Paper 2 Zero and Net Zero Carbon Fuel Options Jan 2020[R]. 2020.
- [48] CIMAC. White Paper 3-GHG Strategy Group-Efficiencies and Maturities of Net Zero Carbon Fuel Pathways[R]. 2020.
- [49] International Maritime Organization. Cut GHG Emissions From Ships Now for a Sustainable Future, IMO MEPC 76 Told[EB/OL]. [2021-09-21]. <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/mepc76.aspx>
- [50] International Maritime Organization. The Fourth IMO GHG Study 2020[R/OL]. [2021-05-10]. <http://www.Maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/03/4th-IMO-GHG-Study-2020.pdf>
- [51] Holman Fenwick Willan LLP. The Formal Inclusion of Maritime Transport in the EU ETS: Key Features and Implications [EB/OL]. [2024-06-05]. <https://www.hfw.com/app/uploads/2024/04/004998-HFW-The-Formal-Inclusion-Of-Maritime-Transport-In-The-EU-ETS-Key-Features-And-Implications.pdf>.
- [52] ZINCIR B A, ARSLANOGLU Y. Comparative Life Cycle Assessment of Alternative Marine Fuels[J]. Fuel, 2024, 358: 129995.
- [53] BILGILI L. Comparative Assessment of Alternative Marine Fuels in Life Cycle Perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110985.
- [54] FERNÁNDEZ-RÍOS A, SANTOS G, PINEDO J, et al. Environmental Sustainability of Alternative Marine Propulsion Technologies Powered by Hydrogen-a Life Cycle Assessment Approach[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153189.
- [55] LINDSTAD E, ESKELAND G S, RIALLAND A, et al. Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel[J]. Sustainability, 2020, 12(21): 8793.
- [56] HUANG J J, FAN H J, XU X Y, et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment for Using Alternative Marine Fuels: a very Large Crude Carrier (VLCC) Case Study[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(12): 1969.
- [57] ZAMBONI G, SCAMARDELLA F, GUALENI P, et al. Comparative Analysis Among Different Alternative Fuels for Ship Propulsion in a Well-to-Wake Perspective[J]. Heliyon, 2024, 10(4): e26016.