

我国内河新能源船舶适应性与发展路径分析

Analysis on Adaptability Assessment and Development Pathways of New-Energy Inland River Vessels of China

李 坤^{1,2}, 徐晓健^{1*}, 范爱龙^{2,3}, 尹奇志^{2,3}, 严新平^{2,3}

LI Kun^{1,2}, XU Xiaojian^{1*}, FAN Ailong^{2,3}, YIN Zhiqi^{2,3}, YAN Xinping^{2,3}

1. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088

China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China

2. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063

School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

3. 水路交通控制全国重点实验室, 武汉 430063

State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52571365)

摘 要

Abstract

【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.08.Z1

[目的] 为明确液化天然气(LNG)、甲醇、电池和氢燃料等新能源技术路线在我国内河船舶中的适用边界与推广方向, 开展内河新能源船舶适应性评价与发展路径研究。[方法] 在梳理我国绿色航运政策环境与内河新能源船舶发展现状的基础上, 构建涵盖技术成熟度、减排潜力、能源安全性、配套基础设施、经济性和标准规范完善性的多维度适应性评价体系, 并对不同能源路线进行对比分析。[结果] 基于适应性评价结果, 提出“醇电互补、LNG过渡、氢能探索”的总体发展思路, 以及分场景、分区域的内河新能源船舶发展路径。[结论] 研究成果可为我国内河船舶能源转型、新能源船舶规模化推广及绿色航运体系建设提供参考。

[Purpose] To clarify the application boundaries and promotion directions of new-energy and clean-energy technologies, including liquefied natural gas (LNG), methanol, battery power, and hydrogen fuel, for inland vessels in China, the adaptability assessment and development pathways of new-energy and clean-energy inland vessels are investigated. [Method] Based on a systematic review of China's green shipping policies and the current development status of new-energy and clean-energy inland vessels, a multi-dimensional adaptability assessment framework is established, covering technology maturity, emission reduction potential, energy security, supporting infrastructure, economic performance, and the completeness of standards and regulations. Based on the framework, comparative analyses are conducted among different energy technology pathways. [Result] Based on the adaptability assessment results, proposes an overall strategy of prioritizing methanol and battery power for long-term development, using LNG as a transitional option, and promoting hydrogen energy through pilot and exploratory applications, as well as development pathways for new-energy and clean-energy inland vessels differentiated by application scenarios and regional conditions. [Conclusion] The findings provide valuable references for energy transition of inland vessels, large-scale deployment of new-energy and clean-energy vessels, and the development of a green shipping system in China.

关键词

Key words

内河船舶; 新能源船舶; 适应性评价; 发展路径; 绿色低碳转型

inland vessel; new energy and clean energy; adaptability assessment; development pathways; green and low-carbon transition

0

引言

当前，推动经济社会绿色低碳转型已成为国际社会应对全球气候变化的普遍共识^[1]。航运业作为连接国内外经济循环、促进经济全球化的重要纽带，其碳排放控制与绿色低碳转型问题正受到国内外广泛关注。我国拥有全球规模最大的国内航行船队，截至 2025 年末，内河运输船舶保有量达 8.93 万艘，合计 1.5 亿净载重吨，其能源消费和污染物排放总量不容忽视^[2]。在此背景下，以能源转型为核心抓手，加快推动内河新能源船舶发展，已成为支撑我国“双碳”目标实现、推进交通强国建设、促进内河航运高质量发展的重要路径。

当前，我国内河航运正积极探索液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG）、甲醇、电池和氢

燃料等新能源在船舶领域的应用^[3]。然而，由于不同能源技术路线差异显著，行业尚未形成统一明确的发展方向，这不仅增加了航运企业绿色转型的难度和风险，还制约了能源、制造等上下游产业链资源的有效集聚。因此，需要开展我国内河新能源船舶发展路径研究，以推动技术路线的逐步收敛和聚焦。

本文在系统梳理我国绿色航运政策环境与内河新能源船舶发展现状的基础上，构建了多维度适应性评价体系，对各类新能源技术在我国内河船舶场景下的适用性进行全面评估。在此基础上，提出我国内河新能源船舶的未来发展路径，并针对规模化推广过程中面临的现实挑战，提出相应的对策建议。

1

我国内河新能源船舶发展现状

1.1 政策环境与发展要求

近年来，围绕内河新能源船舶推广应用，我国已初步构建起多层次、多维度的政策支持体系，政策环境持续优化。在国家战略层面，“双碳”目标和交通强国建设对交通运输绿色低碳转型提出明确要求，为内河航运加快能源结构调整和船舶装备绿色升级提供了顶层指引^[4-8]。在行业政策层面，绿色交通、内河航运高质量发展、

老旧营运船舶更新、交能融合等相关政策陆续出台，进一步明确了新能源船舶推广应用、配套基础设施建设、产业链培育等重点方向^[9-15]。在地方层面，江苏、浙江、安徽、上海、山东和湖北等地结合地方水运特点和产业基础，积极出台相关政策，大力推动本地区新能源船舶发展^[16-21]。我国内河新能源船舶主要政策见表 1。

表 1 我国内河新能源船舶主要政策
Tab. 1 Major Policies for New-Energy and Clean-Energy Inland Vessels in China

层级	政策名称	时间	主要内容
国家层面	《交通强国建设纲要》	2019 年 9 月	从绿色交通建设、交通运输能源转型、老旧船舶更新和清洁能源推广等方面，对新能源船舶发展作出部署，明确支持电动、LNG 动力、氢能源和绿色甲醇动力等船舶应用
	《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》	2021 年 9 月	
	《2030 年前碳达峰行动方案》	2021 年 10 月	
	《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》	2024 年 3 月	
	《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》	2024 年 7 月	
行业层面	《内河航运发展纲要》	2020 年 5 月	围绕绿色智能船舶发展、新能源动力推广、老旧营运船舶更新、补能基础设施建设等方面展开，明确支持 LNG、电池、甲醇、氢燃料动力等技术路线在适宜船型和场景中应用，并通过报废更新补贴、优先靠泊、优先过闸等激励措施，推动新能源船舶发展
	《绿色交通“十四五”发展规划》	2021 年 10 月	
	《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》	2022 年 9 月	
	《交通运输大规模设备更新行动方案》	2024 年 5 月	
	《交通运输老旧营运船舶报废更新补贴实施细则》	2024 年 8 月	
	《关于推动交通运输与能源融合发展的指导意见》	2025 年 3 月	
	《关于推动内河航运高质量发展的意见》	2025 年 6 月	

对国家、行业及地方政策进行分析可知，我国内河新能源船舶政策体系已从宏观战略引导逐步延伸至行业专项支持与地方场景化示范，政策着力点集中于航运绿色低碳转型、绿色智能船舶发展、老旧船舶报废更新、充换电及加注等补能基础设施建设、标准规范与安全监管体系完善，以及区域试点示范等方面。

从政策演进趋势看，早期政策鼓励 LNG、纯电、甲醇、燃料电池、太阳能、风能和氢能等多

种能源形式的全面探索；近年来，随着“双碳”目标深入推进和绿色低碳技术加速发展，政策导向逐步从“多元探索”向“绿色低碳导向”转变，更加重视电池动力、绿电、绿醇、绿氨和绿氢等低零碳能源的推广应用，并着力推动不同技术路线与船型、应用场景及区域条件相匹配，促进内河新能源船舶从多元并存向重点聚焦、规模化发展方向转变。

1.2 内河新能源船舶现状

目前，我国内河新能源船舶主要包括 LNG 动力船舶、纯电池动力船舶、甲醇动力船舶和氢燃料动力船舶。截至 2025 年，内河新能源船舶总数约 1 300 艘，船型覆盖普通货船、液货船、客船和工程船等多种类别。

1) LNG 动力船舶

LNG 动力船舶是指以天然气为单一燃料或采用天然气与燃油 2 种燃料的船舶^[22]。我国 LNG 燃料动力船舶起步较早，已具备较为坚实的推广

基础^[23]。截至 2025 年，内河已建成 LNG 动力船舶 660 余艘，船型以普通货船、液货船及客船为主，其中普通货船占比最高，多为 2 000 吨级以上船舶，主要分布在广东、江苏和广西等地。随着 LNG 动力技术日趋成熟和政策激励力度持续加大，新建船舶正逐步向高替代率、单一 LNG 燃料方向演进，典型代表如我国首艘纯 LNG 动力万吨级散货船长航货运 005 轮，见图 1。



图 1 长航货运 005

Fig. 1 Changhang Huo Yun 005

在燃料加注方面，内河 LNG 动力船舶主要采用岸基加注和趸船加注方式，同时辅以码头撬装加注和 LNG 换罐补给等移动加注模式^[24-25]。截至 2025 年，内河已投用固定 LNG 燃料加注设施 13 处，主要分布在长江和珠江水系。

2) 纯电池动力船舶

纯电池动力船舶是指正常航行中仅依靠蓄电池（含锂离子蓄电池和能量型超级电容器）作为唯一推进动力和主电源的船舶^[26]。近年来，我国电动船舶发展迅速，截至 2025 年已投运纯电动

力运输船舶 620 余艘，其中货船 36 艘，以 2 000 DWT 左右的中小型集装箱船和散货船为主，多采用箱式电源作为推进动力源，集中分布于浙江、山东和江苏等地；客船 580 余艘，主要服务于滨江旅游观光、库湖区及渡运航线等中短途场景，均采用蓄电池舱布置形式，集中分布在湖南及江浙区域。随着电池技术迭代升级和充换电基础设施网络不断完善，纯电池动力船舶正由中小型、短距离、固定航线场景，逐步向更大吨位、更长续航和规模化应用方向拓展。

纯电池动力船舶补能方式包括充电和换电 2 种模式^[27]。客船多采用充电方式，充电设施基本按“一船一桩”模式在固定泊位配套建设；货船以换电或充换结合为主。截至 2025 年，内河已投用电动货船充 / 换电设施共计 32 处，其中充电设施 20 处、换电站 12 处，基本服务于固定船舶，

主要分布在江苏、浙江和安徽等地。近年来，充换电设施正由低压交流小功率慢充向直流大功率快充技术发展，目前已具备兆瓦级充电能力^[28]。江苏远洋“南京—徐州”航线纯电动货船船队见图 2。



图 2 江苏远洋“南京 - 徐州”航线纯电动货船船队

Fig. 2 All-Electric Cargo Vessel Fleet on Jiangsu Ocean Shipping's Nanjing-Xuzhou Route

3) 甲醇动力船舶

甲醇动力船舶是指以甲醇作为全部或部分燃料的船舶，包括甲醇单一燃料、双燃料发动机直接驱动，以及甲醇发动机发电与蓄电池相结合的电力推进形式^[29]。截至 2025 年，我国已建成甲醇动力运输船舶 19 艘，主要包括散货船、集装

箱船和液货船，集中分布于长江水系，以重庆地区为主，涵盖千吨级至 2 万吨级江海直达船，以 3 000 t ~ 6 000 t 中型船舶居多。随着全国首艘甲醇单一燃料江海直达散货船创新 19 轮等船舶陆续交付运营（见图 3），我国甲醇动力船舶正逐步向单一燃料、高替代率方向迈进。



图 3 创新 19 轮

Fig. 3 Chuang Xin 19

目前，内河尚未有专用船用甲醇燃料加注设施投用，主要采用撬装加注方式，加注趸船和移动加注船舶等设施仍在建设中。

4) 氢燃料动力船舶

氢燃料动力船舶是指以氢为全部或部分燃料，通过氢燃料电池或氢内燃机等动力装置提供推进动力或电力的船舶^[30]。目前，我国内河氢燃

料船舶尚处于试点探索阶段，已投入运营三峡氢舟1交通船、西海新源1号旅游商务接待船和东方氢港内河64 TEU集装箱船（见图4），均采用氢燃料电池动力系统；氢内燃机船舶仍处于研究建造阶段，相关示范项目已在武汉和上海等地推进^[31-32]。



(a) 三峡氢舟1交通船



(b) 东方氢港集装箱船

图4 三峡氢舟1交通船和东方氢港集装箱船

Fig. 4 Three Gorges Qing Zhou 1 Passenger Ferry and Dong Fang Qing Gang Container Ship

氢燃料动力船舶以岸基加注和撬装加注为主^[33]。目前，我国已建成1座岸基固定式加氢站，即“中国三峡绿电绿氢示范站”，该站为国

内首个内河码头型制氢加氢一体站，专为三峡氢舟1交通船提供加氢服务。

2 我国内河新能源船舶适应性研究

2.1 评价维度与分析框架

为全面评估不同新能源技术路线在我国内河船舶中的应用适应性，围绕内河船舶运营特点及能源转型需求，构建涵盖技术成熟度、减排潜力、能源安全性、配套基础设施完备性、经济性和标准规范完善性等维度的适应性评价体系。通

过对LNG、甲醇、纯电池和氢燃料等典型技术路线进行系统对比，分析各能源路线在内河船舶应用中的基础条件、优势短板及适用边界，为明确分场景、分阶段的发展路径提供决策支撑。评价体系构成见表2。

表2 我国内河新能源船舶适应性评价体系

Tab. 1 Adaptability Assessment Framework for New-Energy and Clean-Energy Inland Vessels in China		
评价维度	主要评价内容	对内河场景应用的影响
技术成熟度	动力系统、关键装备等的成熟度水平、国产化水平，后续发展潜力等	影响技术路线的内河船型适配能力、运行可靠性、工程化推广基础和规模化推广可行性等
减排潜力	船端CO ₂ 减排效果、NO _x /SO _x /PM等污染物减排效果、全生命周期碳排放能力等	影响船舶减污降碳贡献度、政策支持程度和推广优先级
能源安全性	能源自主可控水平、能源供需要匹配能力	影响船舶能源供应保障能力、持续稳定运行能力、运营经济性
配套基础设施完备性	补能设施完备性、网络覆盖水平以及未来建设难易程度	影响船舶补能便利性、运营稳定性和规模化推广可行性
经济性	船舶建造成本和船舶运营成本	影响船东初始投资压力、商业可行性、航运企业应用意愿等
标准规范完善性	船舶设计建造、检验认证、燃料加注/充换电作业等方面标准规范配套程度	影响船舶的检验、审批、示范应用及规模化推广

2.2 适应性分析

2.2.1 LNG

1) 技术成熟度。船用 LNG 技术装备已较为成熟,国内已基本形成自主可靠、经济适用的船用 LNG 装备体系,能满足内河 LNG 动力船舶现阶段的发展需要。未来技术升级方向主要包括提升发动机热效率、降低甲烷逃逸水平,以及通过 LNG 与电池组合的混合动力电力推进方式,提升船舶动态响应性能和整体能效^[34-35]。

2) 减排潜力。相较于传统燃油船舶, LNG 动力船舶可显著降低 NO_x 、 SO_x 和颗粒物排放,其中 NO_x 最高可降低约 70%, SO_x 和颗粒物分别可降低约 99% 和 95%。但化石 LNG 碳减排潜力相对有限,完全燃烧理论的碳减排效率约 25%,且甲烷逃逸会在一定程度上削弱其整体减排效果^[36]。

3) 能源安全性。我国 LNG 主要依赖海外进口及内陆国产气液化,对外依存度约 41%^[37],供应能力和价格水平受国际形势及季节性需求变化影响较大,存在一定不确定性。沿海地区 LNG 供

应基础较好,但内河地区受制于槽车转运距离、运输成本和加注设施布局等因素,能源可得性和规模化保障能力相对有限。

4) 配套基础设施完备性。我国内河 LNG 加注设施已具备一定基础,基本能满足现有 LNG 动力船舶的补能需求。但受建设条件、审批监管和运营经济性等因素制约,现有加注网络难以支撑 LNG 动力船舶的进一步规模化推广应用。

5) 经济性。经过十余年发展,国内 LNG 动力船舶建造成本已大幅下降,现阶段平均较传统柴油船舶高出约 25%~30%^[38]。2025 年,内河 LNG 加注价格约为 4 500 元/t,相较柴油具备一定燃料成本优势,但受 LNG 市场价格波动影响,其经济性稳定性面临不确定性。

6) 标准规范完善性。经过十余年发展,我国在船舶应用 LNG、LNG 加注作业及加注设施建设等方面已形成较为完善的标准规范体系。

2.2.2 甲醇

1) 技术成熟度。我国内河船用甲醇动力技术尚处于谱系化构建初期,已初步形成 140 kW~1 600 kW 功率范围的发动机产品,可覆盖部分 1 000 DWT~20 000 DWT 运输船舶的动力需求。但适用于内河船型的中高速甲醇发动机在燃烧消耗率、运行稳定性、经济性和可靠性等方面仍需要进一步验证,安全性设计尚不成熟^[39]。随着燃料净化、电控防腐策略及专用润滑油技术逐步成熟,国产甲醇中高速发动机有望在未来 5~8 年逐步实现工程化应用。

2) 减排潜力。相较于传统燃油船舶,甲醇动力船舶可大幅降低 NO_x 、 SO_x 和颗粒物排放,其中 NO_x 最高可降低约 80%, SO_x 和颗粒物分别可降低 99% 以上和 95%,船端温室气体理论减排率为 8%~10%^[40]。若使用绿色甲醇,全生命周期碳减排潜力可达 90%。

3) 能源安全性。我国是全球最大的甲醇生产国,年产能约 1.1 亿 t,具备较强的自主供应能力。“三北”地区绿色甲醇规划产能约 2 600 万 t,在建产能约 200 万 t,为船舶应用绿色甲醇提供了资源基础^[41]。

4) 配套基础设施完备性。国内绿色甲醇呈

现“产销分离”的空间格局^[42]。短期内可依托公路、铁路、水路衔接“三北”产区与长江流域消费市场,长期可通过管道运输提升供应保障能力。目前,尚无船舶专用加注设施投运,但是甲醇在常温常压下易于储存,可依托现有水上加油网点拓展加注功能,建设难度较低,有利于加快形成甲醇加注网络。

5) 经济性。甲醇动力船舶主要增加甲醇发动机、燃料舱等设备,发展初期建造成本较传统燃油船舶增加约 25%,未来随着规模化应用有望逐步下降。国内传统甲醇加注成本约为 2 400 元/t~3 000 元/t,具备一定的成本优势,但绿色甲醇燃料市场尚处于培育阶段,暂不具备经济性^[43]。

6) 标准规范完善性。交通运输部海事局已发布《醇燃料动力船舶技术与检验暂行规则》和《甲醇燃料加注船舶技术与检验暂行规则》,《甲醇燃料水上加注作业安全规程》《甲醇燃料内河加注趸船法定检验暂行规则》《船用甲醇燃料》等法规标准正在编制中^[41]。总体来看,船用甲醇法规标准规范体系正逐步健全完善。

2.2.3 电池

1) 技术成熟度。我国船舶动力电池均为磷酸铁锂电池,相较于三元锂电池,具备更好的安全性和更长的循环寿命,技术成熟度和可靠性持续提升^[44]。近5年来,主流厂商电池电芯能量密度已提升约70%,达到160(W·h)/kg~200(W·h)/kg。基于直流配电系统的电池管理系统(Battery Management System, BMS)、能量管理系统(Energy Management System, EMS)、功率管理系统(Power Management System, PMS)等各类电控系统可满足不同类型、吨级船舶的配置需求,2 000 kW以下电机已初步形成产品谱系。未来,随着电池能量密度进一步提升及电池轻量化、小型化发展,电动船舶的适用场景将得到进一步拓展^[45]。

2) 减排潜力。电动船舶可实现船端大气污染物和CO₂零排放,减污降碳优势突出。随着可再生能源发电占比持续提升,其全生命周期碳减排能力将进一步增强。

3) 能源安全性。2025年,全国火电累计装机容量达15.39亿kW,风电、光伏累计装机容量合计达18.4亿kW,电力供应总体稳定,可为电动船舶规模化应用提供可靠支撑^[46]。随着新型电力系统建设和能源结构持续优化,电力供应的清洁性和自主可控性将进一步提高。

4) 配套基础设施完备性。电动船舶充换电

设施建设技术总体可行,但受高压直流大功率补能、电网增容和港口箱式电源堆存等条件制约,建设协调难度和投资强度较高。现阶段更适宜在特定区域内,结合电动船舶协同布局,以高密度方式建设充换电网络^[47]。

5) 经济性。电动船舶需要配置“三电”系统及大容量电池,设计制造复杂、定制化程度高,导致建造成本显著增加,其中客船增幅约30%~50%,货船普遍成本翻番^[48]。然而,通过“船电分离”、标准化设计、模块化建造和批量化生产,建造成本仍有进一步下降空间^[49]。电动船舶运营经济性主要取决于油电价差、电价机制和充电设施利用率。在免收容量电费且高频规模化运营条件下,具备用能成本优势;但若采用两部制电价且单站服务规模不足,容量电费将显著推高平均用电成本,削弱其运营经济性。

6) 标准规范完善性。电动船舶相关标准规范正加快制定中。交通运输部海事局已发布《纯电池动力船舶技术与检验暂行规则》,交通运输部、工业和信息化部、国家能源局联合印发《电动船舶重点标准工作计划》,预计2027年前完成21项国家和行业重点标准制订工作,涵盖电动船舶及充换电设施的建设、运营、操作及检验检测等全链条环节^[41]。

2.2.4 氢燃料

1) 技术成熟度。现阶段,我国船用氢燃料电池动力系统仍处于示范应用和工程化验证阶段,系统额定功率可达90 kW~450 kW,设计寿命约5 000 h~10 000 h。船载储氢主要采用35 MPa高压气态储氢方式^[50]。目前,已有多家企业船用燃料电池系统及储氢系统获得中国船级社型式认可。未来,随着燃料电池功率密度、系统寿命和储氢技术水平不断提升,氢燃料动力船舶的续航能力和场景适应性将逐步增强^[51]。

2) 减排潜力。氢燃料动力船舶可实现船端大气污染物和CO₂零排放,减污降碳优势显著。从全生命周期来看,氢能碳减排潜力取决于制取方式:灰氢减碳潜力约15%~40%,绿氢减碳潜力可达90%左右。

3) 能源安全性。我国是全球最大的氢能生产国,制氢途径包括煤制氢、天然气制氢、工业

副产氢和电解水制氢,资源供给潜力较大^[52]。截至2025年底,我国可再生能源制氢项目累计建成产能超过25万吨/年,较上年实现翻番式增长,氢能“生产-储运-应用”产业链条逐步贯通,为氢能产业发展奠定了坚实基础^[53]。

4) 配套基础设施完备性。氢燃料加注设施建设受高压或低温储运、审批流程复杂、市场需求偏低及投资成本高昂等因素制约,现阶段面临较大的建设难度和不确定性。

5) 经济性。船舶氢燃料电池电堆及储氢技术复杂,设计和制造要求较高,关键材料尚未完全实现国产化,导致氢燃料电池动力船舶建造成本显著高于传统燃油船舶^[51]。现阶段,氢燃料电池单位功率成本约为船用柴油机的5.0~7.5倍。

6) 标准规范完善性。交通运输部海事局已发布《氢燃料动力船舶技术与检验暂行规则》,

中国船级社发布了《氢燃料加注作业指南》，为氢燃料动力船舶的设计、检验及加注作业提供了依据^[54]。但目前尚未出台相关国家标准和行业标准，标准法规体系仍需要进一步健全完善。

2.3 不同能源路线综合对比

为直观对比不同新能源技术路线在内河船舶应用中的适应性，本文将各评价维度划分为“高、较高、中等、较低和低”5个等级。等级划分主要依据各能源路线在各维度的应用基础和限制条件，具体划分标准见表3。基于2.2节对不同能源路线在内河船舶适应性的系统分析，各能源多维度适应性对比结果见表4，相应热力图见图5。

表3 评价等级划分标准
Tab. 3 Assessment Level Classification Criteria

评价等级	划分标准
高	应用基础成熟，对船舶规模化推广支撑能力强
较高	具备较好基础，但仍存在少量制约和可优化空间
中等	具备一定应用基础，同时存在较为明显的短板
较低	处于示范应用或培育发展阶段，短期支撑能力有限
低	基础薄弱，存在关键问题需要突破，短期难以支撑规模化推广应用

表4 不同能源对船舶适应性评价
Tab. 4 Adaptability Assessment of Different Energy for Ships

评价维度	LNG	甲醇	电池	氢
技术成熟度	高。内河船用LNG内燃机基本谱系化	中等。核心技术装备仍在验证，5a~8a有望趋于成熟可靠	较高。“三电系统”核心装备技术成熟，电池能量密度对其应用场景仍有限制	较低。核心技术装备仍在研发试点，5a~10a有待取得突破
减排潜力	中等。可实现减碳20%~25%，但存在甲烷逃逸等问题	较高。绿色甲醇可实现全生命周期减碳90%	高。可实现船端零排放	高。可实现船端零排放
能源安全性	中等。能源进口依赖度高，供应安全存在不确定性	高。甲醇产量居世界首位，能源自主可控能力强	高。发电装机容量充足，电力资源供应、自主稳定充足	高。我国氢能产能稳定，能源自主可控能力强
配套基础设施完备性	较高。加注设施可满足当前需求，后续大规模建设存在限制	较低。尚无船舶专用加注设施投运，但可依托现有水上加油网点拓展加注功能，建设技术难度和投资强度较低	中等。受大功率补能、电网增容、码头条件、箱式电源堆存和高密度布局要求影响	低。储运加用瓶颈尚需突破，审批、市场需求、投资成本等存在限制，短期难以完善成网
经济性	较高。建造成本增幅可控，燃料成本当前价格具有优势，但存在不稳定性	中等。建造成本增幅可控，传统甲醇具备一定经济性，绿色甲醇尚不具备经济性	较低。建造成本显著高于燃油船舶，电价受容量电费、充电设施利用率等影响显著	低。建造成本和燃料成本均显著高于燃油船舶
标准规范完善性	高。已形成较为完善的标准规范体系	中等。水上加注作业、船用甲醇燃料等标准规范正在制定	较高。重点标准明确，并在加快制定中，已有多项关键标准发布	较低。相关法规和指南发布，但是相关国家、行业标准尚未制定

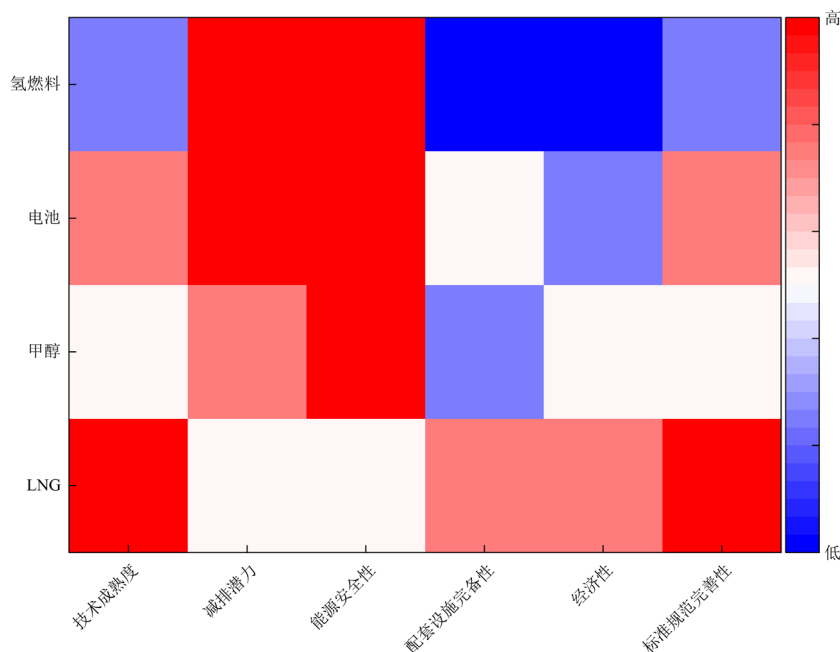


图 5 不同能源对船舶适应性热力图

Fig. 5 Heat Map of the Adaptability of Different Energy Pathways to Inland Vessels

通过对不同能源类型对船舶的适应性分析可知，目前尚无单一能源解决方案能实现内河全场景覆盖。综合研判，未来 5 a ~ 10 a，甲醇和电池动力将成为内河航运领域的主要新能源应用方向，但目前仍处于发展初期，面临建造成本偏

高、运营成本较大、技术装备尚待成熟、配套设施不完善等制约，仍需要政策持续扶持和针对性推动解决。LNG 技术和市场基础较为成熟，初步具备自主发展能力，可在一定时期内发挥过渡替代作用。

3

我国内河新能源船舶发展路径

3.1 路径选择原则

综合不同能源技术路线适应性评价结果，立足内河航运绿色低碳比较优势，并充分考虑内河运输市场成本敏感、场景差异显著等特征，按照以下原则分类有序推进我国内河新能源船舶发展。

1) 坚持绿色低碳导向。紧密围绕“双碳”目标和交通强国建设要求，以船舶污染物和温室气体减排为核心，优先发展减排效果显著、低碳化潜力大、符合未来能源转型方向的技术路线。

2) 坚持场景牵引。结合内河船舶吨级、航线距离和区域资源禀赋等差异，分类选择适宜的能源路线，推动不同技术路线在各自优势场景中

率先实现应用突破。

3) 坚持基础设施协同。统筹船舶推广应用、能源供应及加注充换电设施建设协同发展，避免船舶投运与配套设施建设脱节，保障新能源船舶运营的可行性和推广的可持续性。

4) 坚持分类施策。优先推广技术成熟、商业模式可持续的路线；对低碳优势明显但经济性不足的路线，给予适度市场培育期；对过渡性能源，允许其阶段性发挥清洁替代作用；对仍处于示范验证阶段的技术，结合典型场景稳妥有序推进。

3.2 发展路径

当前及未来一段时期，内河航运替代燃料仍将呈现 LNG、甲醇和电池等多元并存、竞争发展

的格局。总体发展路径见图 6。

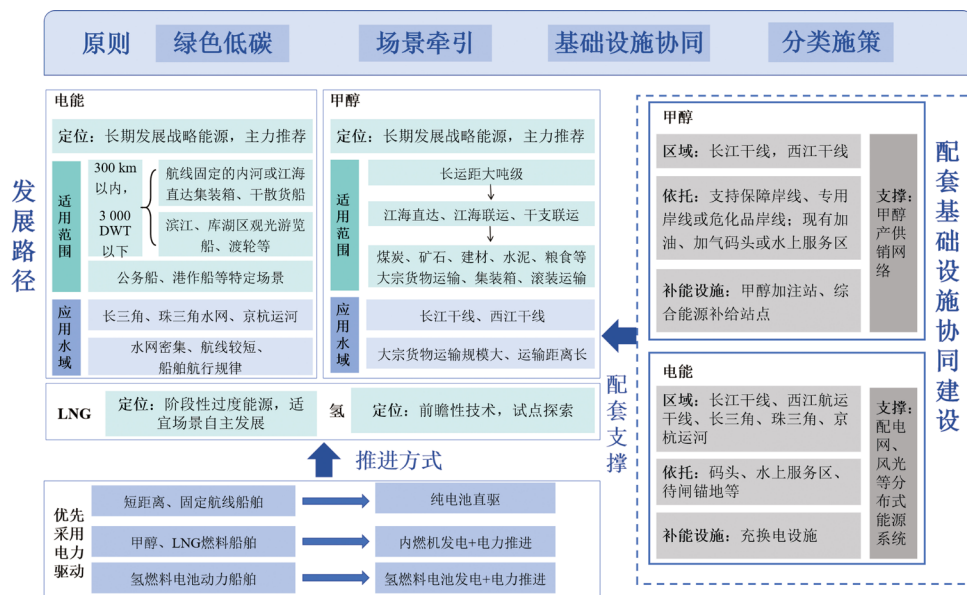


图 6 我国内河新能源船舶发展路径
Fig. 6 Adaptability Assessment of Different Energy Pathways for Inland Vessels

1) 推动醇电互补、有序发展

将电能和甲醇定位为内河船舶长期发展的战略能源方向，作为主力推荐；将 LNG 定位为阶段性过渡能源，在适宜场景中自主发展；将氢能等定位为前瞻性技术，稳妥开展试点探索。以此推动内河船舶能源转型由多元示范逐步向重点聚焦和规模化应用方向演进。

2) 推动多场景分类应用

在 300 km 运距以内、3 000 DWT 以下的客货运场景优先采用电动船舶。其中，航线相对固定的内河及特定航线江海直达集装箱船、干散货船等中短途货运场景，规模化发展电动货船；滨江、库湖区观光游览及轮渡等场景，推广应用电动客船。在公务船、港作船等特定场景中加强电动动力应用。

在长运距、大吨级货运场景中采用甲醇动力船舶，聚焦江海直达、江海联运、干支联运等长距离运输场景，覆盖煤炭、矿石、建材、水泥和粮食等大宗货物运输，以及集装箱、滚装运输等领域。

3) 明确重点水域主导方向

近中期，长江干线、西江干线等大宗货物运输规模大、长距离运输需求突出的水域，货船重点以甲醇动力为主；长三角、珠三角水网及京杭运河等水网密集、航线相对较短、船舶航行规律性强的区域，以电池动力为主。

4) 优先采用电力驱动

推动新能源船舶动力系统由传统内燃机直推方式向电力推进系统升级，在扩大适用场景的同时，为船舶智能化发展奠定基础^[55]。短距离、固定航线船舶可优先采用纯电池直驱方式；甲醇、LNG 等液体或气体燃料船舶，可探索采用内燃机发电与电力推进相结合的综合电力推进方式；氢燃料动力船舶可采用燃料电池发电与电力推进相结合的方式开展示范应用。

5) 推动配套基础设施协同建设

在甲醇加注设施方面，在长江干线形成贯通全线的甲醇加注服务能力，在西江航运干线结合市场需求有序布局加注站点，强化船舶甲醇加注设施与产供储销运网络协同，保障燃料供应。

稳定。依托支持保障岸线、专用岸线或危化品岸线，利用现有加油加气码头或水上服务区拓展甲醇加注功能，打造综合能源补给站点。

在充换电设施方面，在长江干线、西江航运干线、长三角、珠三角和京杭运河等重点区域，

依托码头、水上服务区和待闸锚地等场所统筹布局充换电设施，提供集约化、便捷化补能服务。加强配电网、分布式风光等能源系统对船舶充换电设施接入的支撑，确保船舶推广与补能设施、电力保障能力协同匹配。

4 主要挑战与对策建议

4.1 主要挑战

1) 核心装备技术有待进一步突破

船用甲醇发动机谱系化尚不健全，适用于内河的中高速机型在燃烧效率、运行稳定性、关键零部件耐腐蚀性及使用寿命等方面仍需要进一步验证和提升。电动船舶受电池能量密度、系统轻量化等因素制约，在大吨级、长距离运输场景中的适用性仍然有限。船用燃料电池系统在功率等级、寿命可靠性及储氢密度等关键技术指标方面仍有待突破。

2) 配套基础设施有待进一步提速

我国内河新能源船舶补能设施建设尚不能完全适应规模化推广需求。甲醇加注设施尚未实现零的突破，绿色甲醇产供储销体系尚处空白。现有岸电设施功率难以满足电动船舶大功率快速充电需求，充换电设施建设受电网增容、建设用地和电箱运输堆存等多重因素制约。

3) 经济性有待进一步提升

新能源船舶建造成本普遍高于传统燃油船舶，其中电动船舶和氢燃料动力船舶尤为明显。现有“两新”补贴政策虽可在一定程度上降低初始投资压力，但政策延续性存在不确定性，且主要覆盖建造环节，对船舶运营阶段的支持相对不足。同时，绿色甲醇价格较高，电动船舶用电成本受容量电费和电价机制影响波动较大，全生命周期经济性仍有待提升。

4) 产业协同有待进一步加强

新能源动力船舶发展涉及船舶制造、动力装备、能源供应、港口运营、航运和金融等多个主体，当前产业链上下游在成本分担、收益共享等方面尚未形成成熟机制。同时，绿色能源的核算、评价和认证体系尚不健全，新能源船舶的环保效益尚未有效转化为经济效益或市场激励，影响了市场主体参与积极性和规模化推广效率。

4.2 对策建议

针对上述挑战，提出以下4点对策建议。

1) 完善政策支持保障体系

国家层面，依托“两新”政策实施窗口期，加大对甲醇、电池动力等新能源船舶建造支持力度；积极争取中央预算内投资对内河甲醇加注设施、船舶充换电设施的支持；推动落实电动船舶充换电设施免收容量（需量）电费政策；引导金融机构加大对新能源船舶领域的信贷支持。

地方层面，结合区域优势条件，在新能源船舶优先过闸、优先靠离泊和优先装卸货等方面给予政策优惠；鼓励支持大型货主、航运企业优先采用新能源船舶运输大宗货物；为新能源船舶检验、登记和营运办证等开辟绿色通道，研究优化配套设施审批流程和运营管理要求。

市场机制方面，完善船舶能耗数据报告机制，建设全国船舶能耗数据库；研究编制内河船舶温室气体自愿减排项目方法学，探索构建内河船舶能源使用与减排效果辅助核算平台，推动新能源船舶积极参与温室气体自愿减排交易。

2) 加强核心技术攻关及标准供给

加快船用甲醇发动机及关键部件研发验证，提升装备可靠性和耐久性。推进高能量密度、高安全性能动力电池、超大功率快充技术、轻量化小型化电池模组、高安全性高可靠性直流综合电力系统、氢燃料动力及储存系统等核心技术攻关，提升内河新能源船舶装备自主供给能力。

加快出台甲醇燃料加注趸船、水上加注作业等相关标准规范；推动落实电动船舶重点标准修

订计划，提升“船-岸-电”衔接的一致性和兼容性；研究制定船舶应用氢内燃机、储氢脱氢系统、储运及加注等技术标准。

制定分水域、分场景的绿色船型目录，形成谱系化、标准化的船舶动力装备配置技术方案，打造具有市场竞争力的系列化船型品牌产品和新能源动力系统，引导内河船舶向标准化、系列化、批量化方向发展。

3) 完善配套基础设施布局与建设

充分依托内河既有水上油气设施，构建便捷高效的甲醇加注体系布局方案。统筹考虑区域电网规划、港口规划和船舶应用场景，系统布局内河电池动力船舶充换电设施，推动设施标准化建设，加大配电网及分布式能源对船舶充换电设施接入的支撑力度。

加强船舶甲醇加注设施与甲醇产供储销运网络的协同布局，推动公路、铁路、水运及管道等

多种运输方式协同发展，确保内河船用甲醇燃料的及时、顺畅供应。

4) 构建产业协同生态

推动新能源船舶产业链上中下游各环节建立稳定的绿色转型价值链体系，打造利益共享的新型合作模式。支持大型货主、装备、能源和港航等企业发挥各自优势，探索“造船-航运-港口-贸易-能源”全链条一体化发展新模式。发挥电池产业优势，支持发展“船电分离”“电池银行”等新型商业模式，开展新能源船舶融资租赁、标准化箱式电源租赁等业务。鼓励能源与港航企业建立与传统能源价格挂钩的长期稳定新能源定价机制。

以典型船型、重点航线和重点区域为载体，开展规模化应用先行先试，推动新能源船舶产业链上下游各主体系统参与，总结形成可复制、可推广的先进经验和发展模式。

5

结束语

当前，我国内河新能源船舶已进入多场景快速发展阶段。综合研判，电能和甲醇综合适应性较强，可作为长期战略能源重点推进；LNG技术成熟度高，在未来一段时期内可发挥过渡替代作用；氢能近中期仍以示范探索为主。未来，应针

对核心技术、配套基础设施、经济性和产业协同等方面的短板，通过强化政策支持、加快技术攻关、完善设施布局、优化产业生态等举措，系统推动内河新能源船舶向全场景覆盖、规模化应用方向迈进。

参考文献：

- [1] 交通运输部水运科学研究院. 中国新能源清洁能源船舶发展报告 (2025)[R]. 2025.
China Waterborne Transport Research Institute of The Ministry of Transport. Report on the Development of New and Clean Energy Vessels in China (2025)[R]. 2025.
- [2] 交通运输部. 2025 年交通运输行业发展统计公报 [R]. 2026.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin on the Development of the Transport Sector in 2025[R]. 2026.
- [3] 严丹霖, 陈一奇, 林子钰, 等. 内河船舶绿色动力技术发展现状分析 [J]. 珠江水运, 2025(15): 116-118.
YAN D L, CHEN Y Q, LIN Z Y, et al. Analysis of the Current Status of Green Propulsion Technology Development for Inland Waterway Vessels[J]. Pearl River Water Transport, 2025(15): 116-118.
- [4] 中共中央 国务院. 交通强国建设纲要 [A]. 2019.
The CPC Central Committee and the State Council. Outline for Building China's Strength in Transport [A]. 2019.

- [5] 中共中央国务院 . 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 [A]. 2021.
The CPC Central Committee and the State Council. Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy[A]. 2021.
- [6] 中共中央国务院 . 2030 年前碳达峰行动方案 [A]. 2021.
The CPC Central Committee and the State Council. Action Plan for Carbon Dioxide Peaking Before 2030[A]. 2021.
- [7] 中共中央国务院 . 推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案 [A]. 2024.
The CPC Central Committee and the State Council. Action Plan for Promoting Large-Scale Equipment Renewals and Trade-Ins of Consumer Goods[A]. 2024.
- [8] 中共中央国务院 . 关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见 [A]. 2024.
The CPC Central Committee and the State Council. The Guidelines on Promoting the Comprehensive Green Transition in the Economic and Social Development[A]. 2024.
- [9] 交通运输部 . 内河航运发展纲要 [A]. 2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Outline for the Development of Inland Waterway Transport[A]. 2020.
- [10] 交通运输部 . 绿色交通 “十四五” 发展规划 [A]. 2021.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for Green Transport Development[A]. 2021.
- [11] 交通运输部 , 国家发展改革委 , 工业和信息化部 , 等 . 交通运输大规模设备更新行动方案 [A]. 2024.
Ministry of Transport of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, et al. Action Plan for Large-Scale Equipment Renewal in Transportation[A]. 2024.
- [12] 交通运输部 , 国家发展改革委 , 工业和信息化部 , 等 . 关于推动交通运输与能源融合发展的指导意见 [A]. 2025.
Ministry of Transport of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, et al. Guiding Opinions on Promoting the Integrated Development of Transportation and Energy[A]. 2025.
- [13] 交通运输部 , 国家发展改革委 . 交通运输老旧营运船舶报废更新补贴实施细则 [A]. 2024.
Ministry of Transport of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission. Implementing Rules for Subsidies for the Scrapping and Upgrading of Old Operating Ships in the Transportation Sector[A]. 2024.
- [14] 交通运输部 , 工业和信息化部 , 财政部 , 等 . 关于推动内河航运高质量发展的意见 [A]. 2025.
Ministry of Transport of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China. Opinions on Promoting the High-Quality Development of Inland Waterway Shipping[A]. 2025.
- [15] 工业和信息化部 , 国家发展改革委 , 财政部 , 等 . 关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见 [A]. 2022.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance of the People's Republic of China, et al. Guiding Opinions on Accelerating the Green and Intelligent Development of Inland Waterway Vessels[A]. 2022.
- [16] 江苏省人民政府 . 加快打造更具特色的 “水运江苏” 三年行动计划 (2024 — 2026 年) [A]. 2024.
Jiangsu Provincial People's Government. Three-Year Action Plan for Accelerating the Development of a More Distinctive "Water Transport Jiangsu"(2024—2026)[A]. 2024.
- [17] 浙江省人民政府 . 高水平建设 “航运浙江” 的实施意见 [A]. 2025.
The People's Government of Zhejiang Province. Implementation Opinions on the High-Level Development of "Shipping Zhejiang"[A]. 2025.
- [18] 湖州市人民政府 . 湖州市推进船舶全域电动化引领绿色智能船舶制造产业发展实施方案 (2025—2030 年) [A]. 2025.

- Huzhou Municipal People's Government. Implementation Plan for Promoting Citywide Vessel Electrification and Leading the Development of the Green and Intelligent Shipbuilding Industry (2025—2030)[A]. 2025.
- [19] 上海市人民政府. 上海市加快推进绿色低碳转型行动方案 (2024—2027 年)[A]. 2024.
Shanghai Municipal People's Government. Action Plan of Shanghai on Accelerating Green and Low-Carbon Transition (2024-2027)[A]. 2024.
- [20] 安徽省工业和信息化厅. 安徽省加快内河绿色智能船舶与特色海洋工程装备高质量发展实施方案 (2024—2027 年)[A]. 2024.
Department of Industry and Information Technology of Anhui Province. Implementation Plan for Accelerating the High-Quality Development of Inland Green and Intelligent Vessels and Specialized Offshore Engineering Equipment(2024—2027)[A]. 2024.
- [21] 湖北省经济和信息化厅, 中共湖北省军民融合发展委员会办公室, 湖北省交通运输厅. 湖北省内河航运绿色智能船舶高质量发展实施方案 (2025—2027 年)[A]. 2025.
Department of Economy and Information Technology of Hubei Province, Office of the Commission for Integrated Military and Civilian Development of the CPC Hubei Provincial Committee, Department of Transport of Hubei Province. Implementation Plan of Hubei Province for High-Quality Development of Green and Intelligent Vessels in Inland Waterway Shipping (2025—2027)[A]. 2025.
- [22] 交通运输部. 船舶液化天然气加注站设计标准: GB/T 51312—2018[S]. 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for Design of LNG Bunkering Station for Vessel: GB/T 51312—2018[S]. 2018.
- [23] 王娟, 练正辰, 余龙. 长江干线液货船新能源动力系统概述 [J]. 船舶工程, 2025, 47(10): 16-26.
WANG J, LIAN Z C, YU L. Review of New Energy Power System for Liquid Cargo Ship in Yangtze River[J]. Ship Engineering, 2025, 47(10): 16-26.
- [24] 周庆哲. 船舶液化天然气加注站建设方式研究及方案探讨 [D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
ZHOU Q Z. Research on Construction Mode and Scheme of LNG Filling Station[D]. Xi'an: Xi'an ShiYou University, 2021.
- [25] 林钢. LNG 燃料罐箱换罐加注站推广应用策略 [J]. 水运管理, 2026, 48(2): 26-28.
LIN G. Strategies for the Promotion and Application of LNG Fuel Container Refuelling Stations[J]. Shipping Management, 2026, 48(2): 26-28.
- [26] 中国船级社. 船舶应用电池动力规范 (2025)[S]. 2025.
China Classification Society. Code for the Application of Battery Power in Ships (2025)[S]. 2025.
- [27] 尹静波, 陈新权, 谭家华. 内河电动船舶研究现状与展望 [J]. 中国航海, 2026, 49(3): 1-14.
YIN J B, CHEN X Q, TAN J H. Research Status and Prospect of Inland Electric Ships[J]. Navigation of China, 2026, 49(3): 1-14.
- [28] 欧林森, 姜福东, 黄霖宝, 等. 基于直流微网储能与超级充电技术的电动船舶充换电系统 [J]. 交通节能与环保, 2025, 21(6): 14-19.
OU L S, JIANG F D, HUANG L B, et al. Electric Ship Charging and Battery Swapping System Based on DC Microgrid Energy Storage and Supercharging Technology[J]. Transportation Energy Conservation & Environmental Protection, 2025, 21(6): 14-19.
- [29] BERTAGNA S, BUCCI V, MARINÒ A, et al. Impact of Fuel Switch to Methanol on the Design of an All Electric Cruise Ship[C]//IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). 2023.
- [30] 徐晓健, 杨瑞, 纪永波, 等. 氢燃料电池动力船舶关键技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 47-67.
XU X J, YANG R, JI Y B, et al. Review on Key Technologies of Hydrogen Fuel Cell Powered Vessels[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 47-67.

- [31] 金叶子. 上海成功研发首艘氢内燃机内河船舶 [N]. 第一财经日报, 2026-05-14.
JIN Y Z. Shanghai Successfully Develops Its First Inland Waterway Vessel Powered by a Hydrogen Internal Combustion Engine[N]. China Business News, 2026-05-14.
- [32] 张衡, 郝天娇. 零碳航行! 国内首艘氢内燃机电推运输船在汉设计建造 [N]. 长江日报, 2026-04-24.
ZHANG H, HAO T J. Zero-Carbon Sailing! China's First Hydrogen-Powered Internal Combustion Engine-Electric Transport Vessel Designed and Built in Wuhan[N]. Changjiang Daily, 2026-04-24.
- [33] 冯雨翔, 曹蛟龙, 吴顺平, 等. 氢燃料动力船岸基加注作业泄漏扩散模拟及影响因素分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 82-86.
FENG Y X, CAO J L, WU S P, et al. Leakage Diffusion Simulation and Influencing Factors Analysis on Shore-Based Bunkering Operation of Hydrogen Powered Ship[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3): 82-86.
- [34] 苏丽. 绿色智能散货船混合动力直流组网系统设计 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 257-267.
SU L. Design of DC Grid System for Green Intelligent Hybrid Bulk Carrier[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 257-267.
- [35] 范爱龙, 贺亚鹏, 严新平, 等. 智能新能源船舶的概念及关键技术 [J]. 船舶工程, 2020, 42(3): 8-12.
FAN A L, HE Y P, YAN X P, et al. Concept and Key Technologies of Intelligent New Energy Ship[J]. Ship Engineering, 2020, 42(3): 8-12.
- [36] 蔡薇, 李东阳, 钱军, 等. 基于 H-LCA 的甲烷泄漏下 LNG 动力船舶碳足迹研究 [J]. 中国航海, 2024, 47(4): 123-129.
CAI W, LI D Y, QIAN J, et al. Carbon Footprint Study of LNG-Powered Ships under Methane Leakage Based on H-LCA[J]. Navigation of China, 2024, 47(4): 123-129.
- [37] 余晓钟, 刘梦薇, 邱湖淼, 等. 我国天然气产业高质量发展路径探讨 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 63.
YU X Z, LIU M W, QIU H M, et al. Exploration of High-Quality Development Path of China's Natural Gas Industry[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 63.
- [38] YUSUF PRIA U, RINI S, RIZAL R, et al. LNG as Marine Fuel Under LGF Code: A Meta-Analysis of Emission Reduction, Economic Viability and Safety Performance[J]. Dinasti International Journal of Digital Business Management, 2026, 7(2): 352-356.
- [39] 李圣军, 吴勇胜, 张东明, 等. 船用甲醇燃料发动机安全性设计 [J]. 船舶工程, 2025, 47(增刊 1): 476-483.
LI S J, WU Y S, ZHANG D M, et al. Safety Design of Marine Methanol Fuel Engine[J]. Ship Engineering, 2025, 47(Suppl. 1): 476-483.
- [40] WU P C, LIN C Y. Feasibility and Cost-Benefit Analysis of Methanol as a Sustainable Alternative Fuel for Ships[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(5): 973.
- [41] 黄海博, 张庆文. 推动内河绿色甲醇船舶和电动船舶发展研究 [J]. 中国海事, 2025(6): 13-16.
HUANG H B, ZHANG Q W. Study on Promoting the Development of Ships Powered by Green Methanol and Electricity in Inland Rivers[J]. China Maritime Safety, 2025(6): 13-16.
- [42] 赵赏鑫. “双碳”目标驱动下甲醇高质量发展路径与储运体系重构 [J]. 油气储运, 2025, 44(9): 961-970.
ZHAO S X. High-Quality Development Path for Methanol and Reconfiguration of Its Storage and Transportation System Driven by the "Dual Carbon" Goals[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(9): 961-970.
- [43] 贾广付, 张卫前. 甲醇燃料船舶发展现状与路径 [J]. 中国海事, 2025(5): 47-50.
JIA G F, ZHANG W Q. Development Status and Paths of Methanol Fuel Ships[J]. China Maritime Safety, 2025(5): 47-50.
- [44] 陈志宇, 徐水金, 张学瑾, 等. 船用磷酸铁锂电池储能系统配置关键技术 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(19): 97-101.
CHEN Z Y, XU S J, ZHANG X J, et al. Key Technologies of Configuration of Marine Lithium Iron Phosphate Batterys Energy Storage System[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(19): 97-101.

- [45] KISTNER L, BENSMANN A, HANKE-RAUSCHENBACH R. Potentials and Limitations of Battery-Electric Container Ship Propulsion Systems[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 21: 100507.
- [46] 国家能源局. 2025 年全国电力统计数据 [R]. 2026.
National Energy Administration. National Electricity Statistics for 2025[R]. 2026.
- [47] 梁民仓, 王胜正. 纯电动绿色船舶长航程航次规划与充换电策略 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(3): 266-278.
LIANG M C, WANG S Z. Long Voyage Planning and Battery Charging/Swapping Strategy of Pure Electric Green Ships[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(3): 266-278.
- [48] 周京媛. 长江流域船舶电动化发展现状及对策研究 [J]. 现代管理, 2024, 14(6): 1139-1145.
ZHOU J Y. Study on Current Situation and Countermeasures of Ship Electrification Development in Yangtze River Area[J]. Modern Management, 2024, 14(6): 1139-1145.
- [49] 高宇, 董慧宜, 吴政翰, 等. 内河船舶充换电商业模式及体系建设分析 [J]. 中国水运, 2025(7): 15-17.
GAO Y, DONG H Y, WU Z H, et al. Analysis of the Business Model and System Construction of Inland River Vessel Charging and Battery Swapping[J]. China Water Transport, 2025(7): 15-17.
- [50] 马峻峰, 杨国刚, 李世安, 等. 燃料电池船舶储氢方式研究现状与展望 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(3): 6-12.
MA J F, YANG G G, LI S A, et al. Research Status and Prospect of Fuel Cell Ship Hydrogen Storage Technology[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(3): 6-12.
- [51] 童亮, 袁裕鹏, 李骁, 等. 我国氢动力船舶创新发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 127-139.
TONG L, YUAN Y P, LI X, et al. Innovative Developmental of Hydrogen-Powered Ships in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 127-139.
- [52] 国家能源局能源节约和科技装备司, 国能氢创科技有限责任公司. 中国氢能发展报告 (2025)[R]. 2025.
Department of Energy Conservation and Science, Technology and Equipment, National Energy Administration; Guoneng Hydrogen Innovation Technology Co., Ltd. China Hydrogen Energy Development Report (2025)[R]. 2025.
- [53] 国家能源局. “十五五” 期间将推进氢能试点, 大力培育未来产业 [N]. 国家能源局, 2026-01-30.
National Energy Administration. Hydrogen Energy Pilot Schemes to be Rolled Out During the 15th Five-Year Plan Period, with a Strong Focus on Fostering Future Industries[N]. National Energy Administration, 2026-01-30.
- [54] 王东兴, 王哲, 赵帆, 等. 氢燃料电池动力船舶技术标准现状分析与发展展望 [J]. 交通信息与安全, 2023, 41(2): 157-167.
WANG D X, WANG Z, ZHAO F, et al. State-of-the-Art and Prospect of Technical Standards for the Ships Powered by Hydrogen Fuel Cells[J]. Journal of Transport Information and Safety 2023, 41(2): 157-167.
- [55] XU H, GUEDES S C. Challenges for the Development of Maritime Autonomous Surface Ships[J]. Autonomous Transportation Research, 2026, 2(1): 1-24.

