

# 我国氢动力船舶创新发展研究

童亮<sup>1,2</sup>, 袁裕鹏<sup>1,2</sup>, 李骁<sup>3</sup>, 严新平<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063; 2. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063;  
3. 武汉众宇动力系统科技有限公司, 武汉 430056)

**摘要:** 航运业迅猛发展促使传统船舶的能耗与环境问题日益显现, 氢动力船舶作为未来水路交通载运工具的发展方向之一将是实现水路交通领域碳达峰、碳中和目标的重要依托, 因而研究我国氢动力船舶创新发展具有迫切性。本文梳理了氢动力船舶的发展现状, 从氢动力船舶产业链发展态势、协同发展战略布局的视角完成了氢动力船舶产业布局研判; 完成了发展氢动力船舶的技术经济可行性分析, 覆盖氢和氨燃料、氢燃料电池、氢内燃机、基础设施、总拥有成本等角度; 从氢气制取、氢气运输、大容量储氢、安全加氢、燃料电池、氢内燃机、多能源协同控制、氢应用安全等方面系统展开了氢动力船舶产业链关键环节分析。立足国情提出了我国氢动力船舶多阶段发展目标, 论证形成了氢动力船舶发展路线图、氢燃料供应体系建设路径。研究建议, 明晰应用场景、突破关键技术、完善配套设施、创新运营体系, 以此推动我国氢动力船舶快速优质发展。

**关键词:** 船舶; 氢动力; 氢能; 燃料电池; 内燃机; 氢燃料供应体系

**中图分类号:** U674 **文献标识码:** A

## Innovative Developmental of Hydrogen-Powered Ships in China

Tong Liang<sup>1,2</sup>, Yuan Yupeng<sup>1,2</sup>, Li Xiao<sup>3</sup>, Yan Xinping<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;  
2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;  
3. Wuhan Troowin Power System Technology Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:** The rapid development of the shipping industry has made energy consumption and environmental problems of traditional ships increasingly prominent. Hydrogen-powered ships are one of the development directions for waterway transportation vehicles and will play a significant part in achieving the carbon peak and carbon neutralization goals in the waterway transportation field. Therefore, it is urgent to research the innovative developmental mode of hydrogen-powered ships in China. The development status of hydrogen-powered ships is summarized in this article, and the layout of the hydrogen-powered ship industry is analyzed from the perspectives of industrial chain development trend and coordinated development layout. The technical and economic feasibility of developing hydrogen-powered ships is analyzed from the aspects of hydrogen and ammonia fuel, hydrogen fuel cell, hydrogen internal combustion engine, infrastructure, and total cost of ownership. Moreover, the key links of the industry chain of hydrogen-powered ships are analyzed, including hydrogen production, hydrogen transportation, large-capacity hydrogen storage, safe fueling, fuel cell, hydrogen internal combustion engine, multi-energy collaborative control, and safety in hydrogen application. Based on

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-04-25

通讯作者: 袁裕鹏, 武汉理工大学交通与物流工程学院副教授, 研究方向为船舶新能源与能效控制; E-mail: ypyuan@whut.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFB2601603); 中国工程院咨询项目“氢能动力运输装备创新应用发展战略(2035)”(2021-XZ-21)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

national conditions, we proposed multi-stage development goals, a development roadmap for hydrogen-powered ships, and a construction path for the hydrogen fuel supply system. To promote the rapid and high-quality development of hydrogen-powered ships, China needs to clarify application scenarios, develop key technologies, improve infrastructure facilities, and innovate operation systems.

**Keywords:** ship; hydrogen-powered; hydrogen energy; fuel cell; internal combustion engine; hydrogen fuel supply system

### 一、前言

当前, 航运业迅猛发展, 柴油机动力船舶伴生的能耗与环境问题日益显现, 如2020年我国航运业的CO<sub>2</sub>排放量达到1.2×10<sup>8</sup> t, 约占交通运输领域排放量的12.6%。水路交通运载工具绿色化是水运行业的技术前沿和未来趋势 [1], 也是航运业实现碳达峰、碳中和 (“双碳”) 目标的重要举措, 发展绿色船舶对促进我国船舶工业转型升级、实施交通强国战略具有重要意义。

在近期, 天然气、甲醇等低碳燃料, 蓄电池技术是降低船舶CO<sub>2</sub>排放量的过渡方案; 在中长期, 氢、氨等零碳燃料技术将是水路交通运载工具实现零排放的重要途径。氢能作为清洁能源, 通过燃料电池方式实现高效发电且不排放CO<sub>2</sub>, 有望在水路交通运输行业的碳减排过程中发挥积极作用。根据国际能源署发布的《中国能源体系碳中和路线图》, 航运业的碳减排主要取决于氢、氨等新型低碳技术和燃料的开发及商业化; 在承诺目标情景中, 2060年基于燃料电池的氢能应用模式将满足水路交通运输领域约10%的能源需求 [2], 兼顾能源高效利用、零排放、船舶舒适度提升, 适应绿色船舶市场需求且应用前景广阔 [3]。

发达国家积极提出氢能源战略并开展氢能相关产业布局, 掌握了氢能和燃料电池相关的核心技术, 开展了包括氢动力船舶在内的多项示范项目 [4~7], 正在研制新型氢动力船舶 [6,8,9]。在我国, 应对“双碳”目标牵引, 加速布局氢能的交通领域应用; 部分企业和机构基于国产化氢能和燃料电池技术进步而相继启动了氢动力船舶研制, 但整体处于前期探索阶段; 后续需要细化和完善我国氢能领域的顶层设计, 为氢动力船舶发展提供科学指引。针对于此, 本文在梳理氢动力船舶发展现状并研判相关产业布局态势的基础上, 重点开展技术经济可行性与产业链关键环节分析, 探讨提出领域目标任务、建设路径, 以期为我国氢动力船舶快速发展研究提供参考。

### 二、氢动力船舶发展现状与产业布局研判

#### (一) 氢动力船舶发展现状

##### 1. 氢动力船舶

氢及氢基燃料是航运行业碳减排及脱碳的良好解决方案, 其应用范围将随着燃料应用技术的成熟、配套设施的完善而逐步扩大。氢动力船舶通常用于湖泊、内河、近海等场景, 以客船、渡船、内河货船、拖轮等类型为主; 海上工程船、海上滚装船、超级游艇等大型氢动力船舶研制是当前的国际趋势, 潜艇采用氢燃料电池动力系统同样具有良好前景。

在现阶段, 氢燃料电池适用于多种内河船舶, 可作为小型船舶的主动力, 也可作为大型船舶的辅助动力; 以质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 类型为主, 功率等级相比传统柴油机动力有较大差距。发达国家已成功研制不同类型氢动力船舶并取得示范应用效果, 如德国“Alsterwasser”游船 [4]、日本燃料电池渔船、法国“Energy Observer”游艇 [5]、美国“Water-Go-Round”渡船 [6]、韩国“Gold Green Hygen”氢动力旅游船 [7]等; 后续将深化研究与应用, 如挪威“Ulstein SX190”海上工程船 [6]、“Topeka”滚装船 [8], 意大利“ZEUS”试验船 [9]等 (见图1)。除燃料电池外, 氢内燃机也是船舶应用氢能的重要途径, 如比利时、日本研制的氢内燃机拖船“Hydrotug”、渡船“Hydro Bingo”。日本企业 (如川崎重工业株式会社、洋马株式会社等) 积极研制氢内燃机, 正在开发中速四冲程发动机、中高速四冲程发动机、低速二冲程发动机。

我国前期研制了“富原一号”“天翔1号”氢动力实验船 (见图1), 但船型、功率均较小。随着陆上新能源汽车产业的蓬勃发展, 氢能和燃料电池技术快速成熟, 为我国氢动力船舶提供了良好的发展机遇。2021年下水的“蠡湖号”游艇、“仙湖1号”游船, 燃料电池功率分别为70 kW、30 kW; 正在研制中的“绿色珠江号”内河货船、“三峡氢舟1号”公务船, 燃料电池功率达到500千瓦级。尽



(a) 国外已下水的氢动力船舶



(b) 国外计划研制的氢动力船舶



(c) 我国氢动力船舶产品情况 (部分)

图1 国内外氢动力船舶的产品情况

管如此，国内船型与国际先进产品相比仍存有一定差距，同时我国氢动力船舶的系统集成技术尚未完全成熟。

### 2. 燃料电池系统

目前，氢动力船舶用燃料电池的单组功率为百千瓦级，装船使用时通常采用多组燃料电池级联而成，如“Alsterwasser”游船配备了2组48 kW PEMFC、214型潜艇配备了2组120 kW PEMFC，“绿色珠江号”内河货船拟配备4组135 kW PEMFC。兆瓦级燃料电池系统作为未来重点发展方向，是实现燃料电池在船舶上广泛应用的基础；“Topeka”滚装船、“Ulstein SX190”海上工程船采用的燃料电池系统功率分别为3 MW、2 MW；巴拉德动力系统公司研制了200 kW船用燃料电池模块，最多可6组使用，即燃料电池系统功率可扩展至1.2 MW。国产船用燃料电池功率等级与国外产品相比仍存在一定差距。2021年，武汉众宇动力系统科技有限公司取得船用燃料电池产品型式认可证书 [10]，相应的TWZFC SZ-80燃料电池装置额定功率为80 kW，正在研制200 kW船用燃料电池系统。

船舶燃料电池系统通常配备一定容量的蓄电池来对燃料电池输出功率进行“削峰填谷”，如“Alsterwasser”游船配置了201.6 kW·h蓄电池 [4]，“Water-Go-Round”渡船搭载了100 kW·h蓄电池 [6]，荷兰“AQUA”概念游艇的蓄电池容量达到1.5 MW·h。可根据船舶功率需求，结合燃料电池和蓄电池供能特征，构建匹配的系统模型以优化蓄电池配置 [11]。

### 3. 储氢装置

现有的氢动力船舶较多采用高压气态储氢方式，如“Alsterwasser”游船、“Water-Go-Round”渡船、“蠡湖号”游艇等；也有少量船舶采用金属氢化物储氢方式，如214型潜艇、“ZEUS”试验船等。鉴于高压气态储氢方式的储氢密度较低、液氢相关技术成熟，发达国家的大型氢动力船舶设计方案多采用低温液态储氢方式，如“Topeka”滚装船、“AQUA”概念游艇等。氢动力船舶的续航里程与船载储氢量密切相关。一般认为受制于船载储氢技术，氢动力船舶仅适用于短距离航行，如“Alsterwasser”游船、“Water-Go-Round”渡船的设计续航时间分别为3 d、2 d。

氢动力汽车相关的加氢技术快速成熟，为解决氢动力船舶加注问题确定了良好基础。在“Alsterwasser”游船示范运营过程中，德国林德集团在搭建码头加氢站，为氢动力船舶提供持续的氢源供应；“Ulstein SX190”海上工程船配有可更换的储氢模块，通过“换罐”方式补充氢能，为氢动力船舶的燃料补给提供了新思路。在我国，船用储氢技术目前以高压储氢为主，后续朝着能量密度更高的储氢技术路线方向发展。

## (二) 氢动力船舶产业链发展态势

船舶产业链包括上游的原材料及配套设施、中游的船舶总装制造、下游的船舶服务等环节。

### 1. 上游环节

船舶上游环节涉及原材料供应、零部件配套等。国外船用燃料电池技术研发活动开展较早，巴拉德动力系统公司、丰田汽车公司等率先推出船用动力系统，在包括氢气设备开发、船体设计与建造、运营管理、氢燃料供应在内的船舶价值链方面具有优势，尤其在船舶大功率燃料电池技术方面保持领先。

我国企业生产的质子交换膜（PEM）性能满足商用需求且具备批量供货能力，形成了自研和批量制备催化剂的能力，推动了膜电极产品的车载批量应用。武汉众宇动力系统科技有限公司自主研制的船用燃料电池系统、中集安瑞科控股有限公司生产的30 MPa船用储氢瓶组已批量出口，都反映了国内氢能与燃料电池行业的良好发展势头。也要清醒认识到，我国船舶相关配套技术水平与世界先进水平仍有不小差距，部分核心配套设备依赖进口的局面有待打破。

### 2. 中游环节

美国、欧盟、日本、韩国的相关航运或燃料电池企业都在积极参与氢动力船舶研发，所开展的示范应用体现出了良好的运营效果。

从综合指标看，我国部分船舶制造企业在规模上已进入世界大型船舶企业集团之列，但在新船型、高端船型的开发与设计方面相比世界一流水平还存在差距。我国氢动力船舶仍处于探索发展阶段，已下水的“蠡湖号”“仙湖1号”船型较小，PEMFC系统输出功率仅为数十千瓦；500千瓦级“绿色珠江号”“三峡氢舟1号”氢动力船舶处于研

制阶段，应用示范明显滞后。

### 3. 下游环节

在美国、欧盟，资源型或综合型港口都积极参与氢能港口转型行动，如美国长滩港、洛杉矶港开展了氢燃料电池拖车与物流车的应用试验，西班牙瓦伦西亚港通过 H2Ports 试点项目来示范应用氢动力正面吊。

着眼“双碳”发展目标，我国港口正在开展氢能应用示范以推进港口绿色化建设。例如，青岛港以打造“中国氢港”为目标，应用了氢动力自动化轨道吊；宁波舟山港穿山港区正在开展“风、光、储、氢”多能源融合示范项目，以风光可再生资源发电、电解水制氢的形式为港区氢负荷（包括氢动力集卡、叉车等）提供稳定氢源，提高能源自洽率并降低碳排放水平。

## （三）氢动力船舶产业链协同发展战略布局

### 1. 上游环节

近年来，欧盟、日本、美国、加拿大等相继发布了氢能发展战略或路线图。我国《氢能产业发展中长期规划（2021—2035年）》明确了氢能发展的战略定位。可以看出，发展氢能成为世界各国共识，而交通领域将率先开展氢能普及应用。

在政策引导和支持下，我国氢能及燃料电池产业发展迅猛，截至2021年年底氢燃料电池汽车保有量约为8938辆，后续有望保持快速增长势头。因与氢动力汽车在上游环节未有明显分化，氢动力船舶在发展初期，可采取氢燃料电池相关的基础研究和关键零部件研制仍以车用燃料电池为源头的发展模式，而在应用过程中需及时评估两类产品的差异性。同时，针对船舶功率需求，着重研制大功率燃料电池系统；针对船舶续航里程需求，着重研制大容量储氢装置。

### 2. 中游环节

目前，我国多地相继布局新能源船舶发展，包括纯电池船舶、液化天然气（LNG）船舶、氢动力船舶等类型。为了加快氢动力船舶的示范和推广，氢动力船舶的综合定位及其领域发展顶层设计有待明确和细化。

传统设计与制造相关企业，均可与氢能企业积极开展合作，结合自身优势以拓展氢动力船舶业务。例如，广州船舶及海洋工程设计研究院与中船

动力研究院有限公司、广船国际有限公司等联合开展了500千瓦级内河氢燃料电池动力货船的研制工作，已获得中国船级社的原理认可证书。与此同时，船级社也需新增并完善氢动力船舶相关的标准和指南，为氢动力船舶优质发展提供关键支撑。

### 3. 下游环节

氢动力船舶应用必然要经历从示范应用到扩大部署再到商业化应用的发展过程，预计2030年前的氢动力船舶应用率仍较低。目前我国水路交通相关的氢能基础设施基本空白，从发展效率的角度考虑，可借助陆上氢燃料电池汽车快速发展的势头，统筹考虑陆路交通、水路交通的氢能基础设施布局与规划，适度超前开展港口、码头的加氢站建设布局，由此促进氢动力船舶的高效率发展。

利用陆海综合制氢加氢站平台，结合纯氢管网，力争同步解决港口氢动力船舶涉及的加氢站加氢量大、占用港口土地面积、影响港口正常作业三大应用难题。基于氢能的物流与工业能源解决方案，在解决港口物流、装卸设备、航运应用等问题之外，宜进一步发挥潜在优势，提前筹划与内部港口岸电、近海风力发电、内陆陆上交通体系的协同发展。

## 三、发展氢动力船舶的技术经济可行性

### （一）氢和氢燃料

制氢技术分为化石能源制氢、工业副产制氢、电解水制氢等[12~14]。化石能源制氢尽管将过渡到可再生能源电解水制氢，但在一定时间内仍占重要地位。利用可再生能源实现低成本、高效率制氢是未来大规模制氢的发展方向，也是各国氢能领域支持的重点方面。现阶段绿氢成本依然偏高（约为32.2元/kg），其中可再生能源电力、电解槽的成本占比达到90%，因此控制绿氢成本关键在于降低可再生能源电价与电解槽成本。未来通过降低可再生能源发电成本、提升电解槽技术水平、以规模化应用促进成本下降，我国绿氢成本有望在2030年、2040年、2050年分别降至14.7元/kg、10元/kg、8元/kg[13]，这就为氢动力船舶的规模化应用逐步提供了经济可行性。

氢燃料是另一种具有应用前景的零碳燃料，还

可作为储氢载体，其能量密度较高、生产成本低、易于储存和运输、产业基础完善，在船舶应用方面具有优势 [15]。我国合成氨技术和产业成熟，目前主要利用化石能源制氨，制造成本较低（约4000元/t） [16]。《中国能源体系碳中和路线图》预测，在“双碳”目标背景下，我国氨产量将由2020年的 $5.4 \times 10^7$  t增加至2060年的 $8 \times 10^7$  t，且2060年有2/3的氨燃料应用于航运行业，至少满足水运行业40%的能源需求。可再生能源电解水制氢再合成氨的成本较高，因而降低可再生能源制氢的成本是控制绿氨生产成本的关键，预计2020—2060年我国可再生能源电解水制氢再合成氨的成本将下降70%以上 [2]。

### （二）氢燃料电池

2010年以来，氢燃料电池成本降低了约60% [17]。根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书（2019版）》提出的目标，燃料电池系统的成本将从2019年的8000元/kW下降到2025年的4000元/kW、2035年的800元/kW、2050年的300元/kW [18]；假定船舶燃料电池系统的功率为500 kW，则2050年单船燃料电池系统成本可控制在15万元左右。

随着我国氢能产业的蓬勃发展，国产燃料电池的电堆功率、最低启动温度、寿命等指标均得以大幅改善，自主化程度也在不断提升。燃料电池电堆成本约占燃料电池系统成本的65%，电堆成本仍有下降空间，中长期的降幅可达85% [17]。我国企业积极布局双极板、膜电极、空气压缩机、氢气循环泵等燃料电池关键零部件研制，如上海捷氢科技股份有限公司生产的燃料电池电堆，58个核心一级零部件全部实现国产化，采用新型贵金属涂层的金属双极板和优化结构进一步提升了燃料电池效率并降低了制造成本 [13]。2020年，燃料电池电堆的成本出现了明显下降势头（3000~4000元/kW），甚至部分产品报价下降至2000元/kW [13]。尽管如此，氢燃料电池电堆及系统的可靠性、耐久性商业化应用的关键，仍待持续优化提升 [19]。

### （三）氢内燃机

现有氢内燃机的有效热效率为35%~45% [20]，而PEMFC系统的效率为50%~60%；虽然氢内燃机的效率偏低，但功率可以达到高值（目前可达到兆

瓦级），已用于拖船和渡船 [6]。在成本方面，氢内燃机明显低于PEMFC系统，以100 kW发电装置为例，基于当前技术的氢内燃机成本仅为PEMFC系统的50% [21]。可以预判，随着船舶储氢技术的发展、氢能基础设施的完善，氢内燃机在船舶上可取得广泛应用。

### （四）基础设施

在我国，现有加氢技术与基础设施以车辆应用为主，而船舶应用基本空白；主流的加氢站规模为500 kg/d、1000 kg/d，对应的建设成本分别为1200~1500万元、2000~2500万元（不考虑土地成本），其中设备、土建成本占比超过70% [16]。氢气压缩机、储氢罐（分为高压储氢罐和液氢储罐）、加氢机是加氢站的核心装备 [17]。在氢气压缩机方面，隔膜式压缩机、液驱式压缩机已实现国产化，未来有望逐步占据国内市场，而离子式压缩机需进一步研制。加氢站储氢装置已具备一定的自主化基础，如中集安瑞科控股有限公司生产的45 MPa大容积无缝钢制储氢气瓶已实现出口 [16]，300 m<sup>3</sup>大型液氢储罐完成了方案设计和小批量生产 [17]。35 MPa规格的加氢机基本实现国产，但加氢枪、流量计、阀件等核心零部件依赖进口；国内企业已掌握70 MPa加氢技术，但相关应用落后于国外 [16]。

在氢动力船舶发展初期，宜借助氢动力汽车的良好发展势头，积累基础设施相关技术；逐步开展船舶领域的氢能应用，以技术改进与装备更新的方式匹配氢动力船舶的专有应用需求。

### （五）船舶总拥有成本

船舶总拥有成本（TCO）包括建造成本、运营成本：前者分为主动力系统成本、辅助动力成本、燃料储罐成本、船身及其他零部件成本等，后者涵盖燃料成本、维修成本、箱位损失、人员工资、保修费等。由于氢动力船舶仍处于研制与小规模应用阶段，相关的TCO分析依然不够充分。针对15 000 TEU氨氢动力集装箱船开展的TCO分析表明，假定配备1台51 MW氨发动机作为主动力，2台4 MW、2台2 MW氢燃料电池系统作为辅助动力，则TCO约是同等条件下传统燃料船舶的2倍；燃料成本是影响氨氢动力船舶经济性能的重要参数 [22]。

## 四、氢动力船舶产业链关键环节分析

### (一) 高效低碳的氢气制取技术

当前, 氢气主要利用化石能源来获得, 约占世界氢气生产量的 95%, 生产过程排放 CO<sub>2</sub>; 利用可再生能源获得的电能来进行电网规模级别的电解水制氢, 生产过程属于零碳排放, 但所占比例仅约 4%~5%。碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术可应用于传统的化石能源制氢过程以降低碳排放量, 但考虑现有技术和基础设施的成熟度, 预计 2030 年前基于 CCUS 技术的化石能源制氢难有明显突破 [2]。因此, 基于可再生能源的电解水制氢是未来氢气制取的发展趋势。

电解水制氢分为碱水电解、PEM 水电解、固体氧化物水电解。碱水电解、PEM 水电解被认为是当前可实际应用的技术 [23]: 前者在我国已经工业化, 国产设备的生产率达到了 1000 Nm<sup>3</sup>/h [24]; 后者正处于从研发走向工业化的前期阶段。近年来, 我国电解水制氢设备的装机容量显著提升, 2020 年装机容量为 18 MW, 约占世界增量的 1/4。在“双碳”目标背景下, 随着技术提升和配套制造业的完善, 2030 年、2060 年我国电解水制氢设备装机容量将分别达到 25 GW、750 GW, 分别占世界总量的 15%、40% [2]。

### (二) 大规模低成本的氢气运输技术

可实现规模化运输氢气的方式主要有高压气氢长管拖车、低温液氢槽车、氢气管道。高压气氢长管拖车方式技术成熟, 适用于运输距离较近、输送量较低、氢气日用量为吨级的用户, 与当前的氢能产业发展规模相适应。国内长管拖车氢气瓶的工作压力多为 20 MPa, TT11-2140-H2-20-I 型集装箱束箱每次可充装氢气约 347 kg。高压气氢长管拖车适用于 200 km 以内的运输, 200 km 距离的运输成本约为 7.72~8.82 元/kg [16]。

低温液氢槽车的运氢能力强 (是高压气氢长管拖车的 10 倍以上), 在 200 km 以上距离的运输成本仅为高压气氢长管拖车的 1/5~1/8 [16], 但氢气液化能耗较高, 如 20 MPa 高压气氢的压缩成本约为 2 元/kg, 而大型氢气液化装置的液化成本约为 12.5 元/kg [17]。此外, 氢气液化装备的初始投资成本不容忽视。在解决相关成本和效率问题后, 液氢

罐车在中远距离的输氢领域将有良好的应用前景。近期, 液氢海运船受到广泛关注, 有可能成为新兴的液氢运输方式, 如日本“Suiso Frontier”液氢运输船。

基于气态氢的管道运输分为两类: 纯氢的管道运输、天然气掺氢的管道运输。管道运输适用于大规模、长距离的氢气运输, 但前期投资较大。当氢气储运设施尚不完善时, 将氢气掺入天然气中并利用天然气管道进行运输, 是一种兼顾技术与成本的大规模运氢方式 (当掺氢天然气的含氢量约为 15% 时, 仅需对原有管道进行适当改造即可 [25]), 主要涉及天然气运输管道与氢气的相容性、氢气泄漏与检测、终端氢气分离等。随着氢能产业规模的扩大、应用需求的增加, 具有运输规模优势的管道输氢将成为优选方式。

### (三) 船舶大容量储氢技术

储氢技术发展呈现出“低储氢密度—高储氢密度”的趋势。高密度储氢技术仍不成熟, 技术路线仍在进行多方案探索, 包括超高压气态储氢 [7]、液化储氢 [26]、金属氢化物储氢 [9,27]、液态有机物储氢 [28] 等。

高压储氢是当前船舶适用的方式, 储氢瓶有 35 MPa、70 MPa 两种规格, 对应的体积储氢密度分别为 25 g/L、41 g/L [16]。国外的 70 MPa 高压储氢技术基本成熟并实现商业化, 如丰田 Mirai 氢燃料电池汽车即采用 70 MPa 储氢瓶。我国的 35 MPa 高压储氢瓶技术标准成熟, 国产氢燃料电池汽车较多采用; 正在研发 70 MPa 高压气瓶, 已接近商业应用阶段。因此, 我国氢动力船舶, 如“绿色珠江号”内河货船先期采用了 35 MPa 高压气瓶储氢方式, 待技术条件成熟后再转向更高规格。

液氢的密度为 70.8 g/L, 在储存密度上较高压储氢有明显优势; 随着氢能产业的快速发展, 低温液态储氢将逐步扩大民用范围, 有望成为未来的主流储氢方式。考虑到现有高压储氢技术的储存密度较低, 无法满足未来船舶续航力的要求, 船舶储氢将朝着能量密度更高的方向发展, 如“Topoka”滚装船、“AQUA”概念游艇计划采用低温液态储氢方式。金属氢化物储氢方式具有储氢体积密度大、压力低、安全性高等优点, 在潜艇上具有良好应用前景, 推广应用过程需着力解决成本、吸脱氢温

度、反应速率等问题。

理论上氨的储氢密度约为 17.6%，液氨的体积储氢密度是液氢的 1.5 倍，加之氨的液化、储存、运输技术成熟，使得以氨为载体的储氢方式成为极具潜力的大容量储氢解决方案。氨的裂化分解是以氨为载体的储氢系统需要解决的关键技术问题，开发低压、低温、高活性、低成本的催化剂是后续研究重点 [16]。甲醇具有较高的储氢密度且自身含氢量达 12.5%，可作为绿氢的载体来实现高效储存和运输，当距离大于 200 km 时较直接运氢具有经济优势 [16]。考虑到甲醇制氢会产生 CO，需配备氢气纯化装置以避免 PEMFC 催化剂中毒。

#### （四）快速安全加氢技术

现有的氢动力船舶储氢方式多样，相应的加氢方式和耗时不尽相同。在“Alsterwasser”游船示范项目中，林德集团在码头建立加氢站为该船提供稳定氢源，船上最多可存储 50 kg 氢气，单次加氢过程耗时约为 12 min；德国 212A 型潜艇采用基于金属氢化物储氢方式，完成 80%、100% 加氢量分别耗时 10 h、25 h。鉴于陆上车用高压气态储氢及加氢技术相对成熟，在氢动力船舶发展初期采用车用方案是可行的发展模式。

与车用加氢相比，船舶加氢具有加注量大，持续时间长的特点，加注设备应采用更加可靠的加注连接方式，同时应具有船岸之间紧急切断的联动功能以满足紧急脱开需要。船舶在码头进行燃料加注时一般不允许船舶断电，因而既保证加氢时燃料电池系统正常工作（供电）以及装卸货等同步操作（SIMOPs）的需要，又保障氢燃料加注操作的安全性，是亟需解决的问题。

#### （五）船舶大功率燃料电池技术

船用燃料电池技术表现为“小功率—大功率”的发展趋势。燃料电池主要分为以 PEMFC 为代表的低温燃料电池，以熔融碳酸盐（MCFC）和固体氧化物（SOFC）为代表的高温燃料电池；前者技术成熟，正在进行产业化、规模化发展，力求实现价格更低、寿命更长、功率更高；后者因其功率高、效率高、氢气纯度要求低等技术优势，更适合船舶应用，也是未来大型船舶的发展方向。

船舶功率需求与船型、操作工况相关，不同船

型的需求功率如表 1 所示 [29]。PEMFC 系统可作为小型船舶的主动力或大型船舶的辅助动力。在现有的氢动力船舶示范项目中，PEMFC 系统输出功率基本为百千瓦级。为了拓宽氢动力船舶的适用场景，未来 PEMFC 系统的输出功率应提高至兆瓦级，这是船舶燃料电池亟需攻克的关键技术。

#### （六）船舶氢内燃机技术

氢气燃烧火焰传播速度快、放热集中，因而氢内燃机相对传统内燃机具有更高的热效率。普通内燃机热效率约为 30%~40%，而德国企业研制的氢内燃机验证机热效率最高达到 42%，我国正在研发的氢内燃机热效率有望达到 44% [16]。也要注意，氢内燃机虽然具有输出功率高、热效率高、节能环保的优点，但存在爆燃、早燃、回火等技术难题，也会产生 NO<sub>x</sub>，因而提升动力系统性能、降低 NO<sub>x</sub> 排放是后续氢内燃机研究亟待攻关的方面。

氢内燃机相比 PEMFC 系统具有输出功率优势，待攻克相关技术难题后，将在船舶领域获得广阔应用。2017 年，比利时海事集团推出了世界首制柴氢双燃料客船，搭载的 Behydro 发动机输出功率为 1000~2670 kW [6]。目前我国的氢内燃机技术集中在汽车领域而尚未开展船舶应用研究，相较国际先进水平还存在较大差距。

#### （七）船舶多能源协同控制技术

常规船舶采用船舶柴油机并以燃用轻 / 重柴油为主，部分采用柴油发电机的电力推进系统用能形式，能源结构相对单一。船舶供能形式的多样化是未来发展趋势，如“Energy Observer”游艇搭载了太阳能光伏发电系统、风力发电系统、锂电池系统、海水淡化系统、PEM 电解水制氢系统、PEMFC 系统等；在日本邮轮超级环保船（NYK

表 1 船舶需求功率情况  
(单位: kW)

类型	电力	推进器	
		慢	快
小型游艇和船舶	—	1~100	—
民用船舶	100~2000	500~1000	50 000
潜艇和海军舰艇	500~2000	1000~2000	50 000

Super Eco-ship) 设计方案中, 动力系统将采用 LNG 燃料电池、太阳能电池、风力助推等 [29]。

在船舶能源供给趋于多样化的形势下, 多种供能系统之间的协同控制技术日益显现出重要性。未来氢动力船舶的动力系统涉及燃料电池、蓄电池(或超级电容)、变流装置、推进电机等设备, 这就需要利用多能源协同控制技术来进行各类设备之间的优化匹配与协同控制, 保障动力系统的安全性、可靠性、经济性 [30]。

#### (八) 船舶氢应用安全技术

船舶航行环境复杂, 易受气象、水文、航道等因素的影响; 船舶系统相对孤立, 若发生安全事故, 人员不易迅速逃离而需等待救援。因此, 船舶需要有较高的安全性。在氢能源及燃料电池的推广应用过程中, 需将与燃料相关的火灾、爆炸等风险发生概率及后果限制在极低水平, 确保相关装置拥有与基于化石燃料的常规主机/辅机具有同等安全水平。现有氢动力船舶相关的安全规范及应急措施有待进一步完善 [3]。氢应用安全技术是氢动力船舶安全运行的基础, 采用数值模拟方法预测船舶氢气泄漏扩散及其风险演变规律, 是制定相关风险应对措施的有效途径 [31]。

#### (九) 氢动力船舶标准及规范

在陆上领域, 氢能及燃料电池技术标准基本成熟, 我国发布的相关技术标准多达 91 项。然而氢动力船舶标准及规范尚不成熟, 相关燃料电池系统以及储氢、加氢系统主要沿用陆上标准。国际海事组织正在开展《使用气体或其他低闪点燃料船舶国际安全规则》关于纳入船舶应用燃料电池系统的技术要求编制工作, 但并不包含燃料存储、供应系统。氢动力船舶技术标准环节存在的问题在于: 规范法规缺项、操作规范缺项、安全研究不足。例如, 船用氢气加注标准(包括液氢加注和金属氢化物的船舶加氢技术)、70 MPa 储氢瓶上船标准、船舶重整制氢标准等均处于缺失状态。

面向氢动力船舶快速发展需求, 相关船舶标准及规范需要尽快进行补充完善: ① 船用燃料电池动力系统专项研究验证, 船舶功率需求较大, 对燃料电池单体的一致性、电池管理系统、散热等要求高于车用系统; ② 氢燃料电池动力船舶设计方案

风险评估分析与船用燃料电池及其处所安全防护专项研究验证, 高盐雾腐蚀和潮湿的海上环境、船舶振动等因素可能降低系统的可靠性和耐久性; ③ 船舶氢燃料加注方式、安全操作规程及监管方式研究, 我国港口或锚地尚无船用氢燃料加注设施, 相关技术与规范需深入研究; ④ 船用储氢系统、氢气供给系统专项研究验证, 及时制定并持续完善氢燃料电池动力船舶的技术标准体系。

### 五、我国氢动力船舶的发展目标与建设路径

#### (一) 我国氢动力船舶的发展目标

应对“双碳”发展目标, 我国乃至全世界在航运业碳减排问题上都面临着巨大压力。发展氢动力船舶, 全面牵引水路交通领域从氢能基础设施到终端应用的建设, 革新水路交通运输装备的用能构成, 支持实现清洁能源转型。围绕交通强国、《中国制造 2025》等行动纲领, 推动传统船舶制造行业的转型与升级, 催生新型船舶设计与研究单位及产业链配套企业, 引领船舶制造业高质量发展。实施大功率燃料电池、大容量储氢、快速加氢、多能源协同控制、氢利用安全等核心关键技术攻关, 制定氢动力船舶标准及规范, 完善氢能配套设施, 推动多类型氢动力船舶的示范应用。

至 2025 年为技术积累阶段。借助燃料电池汽车技术进展, 重点突破船用氢燃料电池等关键技术, 制定氢动力船舶标准及规范; 完成氢动力船舶装备研发, 在内河/湖泊等场景实现氢动力船舶示范应用。

2025—2030 年为完善产业阶段。构建氢动力船舶设计、制造、调试、测试、功能验证、性能评估体系, 建立配套的氢气“制储运”基础设施; 扩大内河/湖泊等场景的氢动力船舶示范应用规模, 完善水路交通相关基础设施。

2030—2035 年为提升质量阶段。降低燃料电池和氢气成本, 提高船用氢燃料电池系统寿命、转化效率和船上储氢量, 研发高温燃料电池和余热利用技术; 构建完备的水路交通载运装备技术和产业体系, 在近海场景实现氢动力船舶应用示范。

2035—2060 年为推广应用阶段。优化氢动力船舶的综合性能, 推广本土商业化应用; 与绿氢、碳中和 LNG/甲醇等动力形式船舶协同, 完成我国水

路交通运输装备领域碳中和目标；在国际航线上开展氢动力船舶应用示范，提升我国氢动力船舶产业的国际竞争力。

## （二）我国氢动力船舶的建设路径

### 1. 面向碳中和的氢动力船舶总体路线图

LNG 船舶应用前景良好，将是近期船舶清洁能源的主要形式。蓄电池技术是现阶段尽快实现内河及近海船舶零排放的解决方案，但能量密度有限，主要在短程、小型船舶上有应用空间，而在中短途运输领域未有广泛应用。氢燃料是实现船舶零排放的重点发展方向，近期将在内河及近海船上开展应用研究。在制氢方面，目前化石能源制氢是主要方式，未来占比将逐步下降，可在 CCUS 技术成熟后引入以进一步降低碳排放；可再生能源制氢是未来主要的制氢途径。在储氢方面，为满足国际远洋航行船舶的续航要求，需进一步发展包括液氢储氢在内的高效储氢技术，甲醇重整制氢、氨分解制氢等现场制氢技术。

氢的最佳应用载体是燃料电池，PEMFC 受限于功率等级较低以及氢气纯度要求高，将主要应用于内河及近海船舶，未来继续发展高温 PEMFC。高温燃料电池（如 SOFC）可使用富氢液体燃料而不再依赖纯氢，采用余热利用技术可进一步提升系统效率，功率等级有望达到兆瓦级，在远期是适用于远洋船舶的技术路线。氢内燃机是另一种氢能动力系统，随着船载储氢技术发展表现出良好的应用前景，将在水路交通“双碳”目标实现过程中发挥重要作用。

氢动力船舶发展路径与氢燃料电池、氢内燃机、储氢等技术以及氢能基础设施紧密相关，按照先内河 / 内湖、再近海、最后远洋的路线分步实施（见表 2）：湖泊区域的游船 / 渡船等，可采用氢燃

料电池动力系统；内河干线小型船舶（8000 t 以下）可采用氢燃料电池动力系统，内河干线大型船舶（8000 t 以上）可采用基于氢、氨、甲醇等燃料的内燃机系统；近海、远洋船舶可采用混合动力系统。

### 2. 氢燃料供应体系建设路径

在近期，化石能源制氢仍占据主导地位，主要分为煤制氢、天然气制氢、化工副产品制氢。煤制氢具有成熟可靠、生产成本低的优势，就生产潜力而言完全可以满足氢能发展需要；在更强调清洁低碳的背景下，CCUS 技术应用会对煤制氢路线产生重要影响。在中期，可再生能源制氢比重将逐步提高，与碳捕获技术结合生产蓝氢也将形成一定的规模。在远期，利用可再生能源发电，再通过水电解制氢将是重要的制氢方式（见图 3）。

适合大规模工程化应用的氢气运输方式主要有高压气氢长管拖车运输、低温液氢槽车运输。目前以高压气氢储运为主，后续将逐步过渡到低温液氢储运为主、以高压气氢储运为辅。未来随着氢气的广泛应用及规模化生产，涉及纯氢的管道运输、天然气掺氢的管道运输的输氢管网建设（或改造）将是能源基础设施的建设重点。

在内河航运领域加大氢能利用范围与规模，形成以船舶为重点、以港口为中心的航运氢能产业生态，将支撑水路交通绿色化发展。积极拓展氢能的港口应用，探索在途氢燃料补给模式，既是制氢产业绿色化发展的需要，也可支持氢动力船舶应用并完善水路交通氢能生态链。

我国沿江经济发达、化工园区集中，工业副产氢产能多临近港口，氢能来源较丰富；氢源附近的港口可就地集中消纳氢能，同时利用航运在供需港口间进行远距离的氢能运输，以氢气规模化运输来

表 2 氢动力船舶发展进度

类别	时间			
	近期	中期	未来	
燃料	氢	灰氢	蓝氢、绿氢	绿氢
	氨	灰氨	蓝氨、绿氨	绿氨
	甲醇	甲醇	甲醇	甲醇(碳中和)
动力装置	燃料电池	PEMFC	高温型 PEMFC/SOFC	高温型 PEMFC/SOFC
	内燃机	高热效率、低 NO <sub>x</sub> 排放	高热效率、低 NO <sub>x</sub> 排放	高热效率、低 NO <sub>x</sub> 排放
氢动力船舶航线演变	内河/内湖	近海	远洋	

降低运氢成本。加氢站布局可考虑与现有油气加注站合建，充裕的工业用地和远离城镇的区位也为加氢站建设审批提供便利条件，还可考虑更加灵活的移动式加氢站。

海上风电制氢指直接通过水电解制氢设备将海上风力发电转化为氢气，再以氢为能源载体实现清洁能源的长期存储，这就为氢动力船舶的海上补充氢燃料提供了可能性。发达国家积极布局海上风电制氢项目，认为未来的枢纽设施可由设置在海上风电场周边的氢燃料中心组成；我国能源体系规划鼓励建设海上风电基地，推动海上风电场向深水远岸区域布局。开展海上风电制氢项目具有一定的趋势性，海上绿氢生产基地有望成为氢燃料供应体系的重要组成部分。

## 六、推动我国氢动力船舶发展的建议

### （一）明晰应用场景

针对氢燃料电池动力系统的发展现状及未来演变趋势，借鉴先发国家的氢动力船舶运营经验，结合我国氢能战略规划与产业布局，明晰适应国情的氢动力船舶应用场景。可按照先内河/湖泊、再近

海、最后远洋的发展次序，制定产业规划，梯次推进技术攻关、装备研制、应用示范、基础设施建设。

### （二）突破关键技术

发挥宏观战略的引导作用，兼顾自主创新与对外合作，系统发挥企业、科研院所、高校的差异化优势，以企业为主体实施氢动力船舶装备创新。着力突破氢动力船舶研发、示范、推广面临的关键核心技术，如高效低碳的氢气制取技术、船舶大容量储氢技术、大功率燃料电池技术等；促进水路交通运载工具氢能应用水平尽快达到国际先进，为更大规模的氢动力船舶应用示范筑牢基础。

### （三）完善配套设施

建议在国家层面开展交通领域能源需求演变态势论证，统筹“水陆空”交通的氢能综合应用格局，研究提出燃料供应体系、基础设施建设等专项规划。鼓励各地区结合自有能源与技术优势，发展低成本、少污染、高可靠的制氢项目并开展应用示范，以试验试用积累工程化经验，为后续的大规模氢能基础设施建设提供依托。

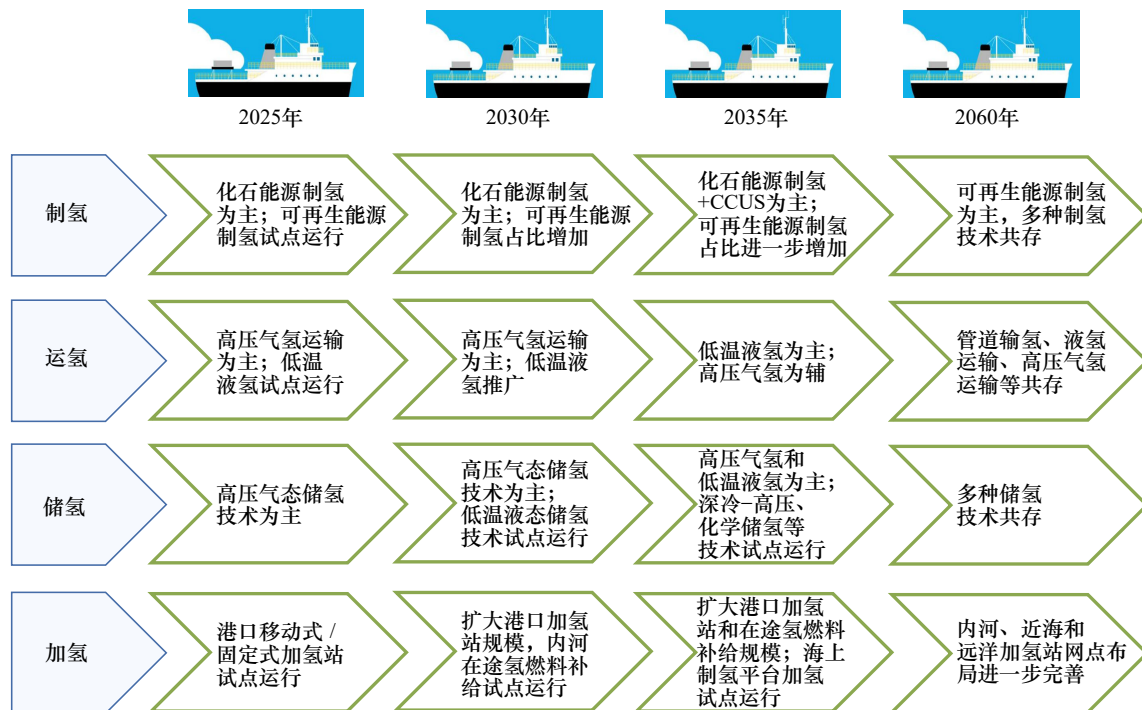


图3 我国氢动力船舶的氢燃料供应体系建设路径

#### (四) 创新运营体系

针对氢动力船舶产业化应用存在的前期投资大、回报周期长的客观实际,积极配套政策、资金等资源支持,鼓励各类企业依托自身优势提前布局氢动力船舶市场,以示范运营支持新型运营模式探索;同步支持传统船舶下游环节积极开拓针对氢动力载运装备的检测、维修、培训等业务。以产业链协同模式探索建立我国氢动力船舶创新运营体系。

#### 参考文献

- [1] 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):9-14.  
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): 9-14.
- [2] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. [EB/OL]. (2021-09-15)[2022-04-14]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>.
- [3] 彭元亭,徐增师.船用氢燃料电池推进技术发展研究[J].中国工程科学,2019,21(6):18-21.  
Peng Y T, Xu Z S. Development of hydrogen fuel cell propulsion technology for ships [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 18-21.
- [4] De-Troya J J, Alvarez C, Fernandez-Garrido C, et al. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(4): 2853-2866.
- [5] 于全虎.氢能和燃料电池及其船舶应用进展[J].船舶,2020,31(5):69-76.  
Yu Q H. Hydrogen, fuel cells and their application on ship [J]. Ship & Boat, 2020, 31(5): 69-76.
- [6] American Bureau of Shipping. Sustainability whitepaper: Hydrogen as marine fuel [R]. Spring: American Bureau of Shipping, 2021.
- [7] Choi C H, Yu S J, Han I S, et al. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(5): 3591-3599.
- [8] Wilhelmsen. Topeka's hydrogen vessels one step closer to reality [EB/OL]. (2021-12-07)[2022-04-14]. <https://www.wilhelmsen.com/media-news-and-events/press-releases/2021/topekas-hydrogen-vessels-one-step-closer-to-reality/>.
- [9] Cavo M, Gadducci E, Rattazzi D, et al. Dynamic analysis of PEM fuel cells and metal hydrides on a zero-emission ship: A model-based approach [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(64): 32630-32644.
- [10] 中国船级社.中国船级社颁发国内首张船用燃料电池产品型式认可证书[EB/OL].(2021-02-01)[2022-04-14].<https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=202102020951400766>.  
China Classification Society. China Classification Society issued the first type approval certificate of marine fuel cell products in China [EB/OL]. (2021-02-01)[2022-04-14]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=202102020951400766>.
- [11] 王珺,王甫,袁金良,等.游船用氢燃料电池和储能电池的优化配置[J].电源技术,2021,45(3):330-334.  
Wang J, Wang F, Yuan J L, et al. Optimized configuration of hydrogen fuel cells and energy storage batteries for cruise ships [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(3): 330-334.
- [12] 中国国际经济交流中心.中国氢能产业政策研究[M].北京:社会科学文献出版社,2020.  
China Center for International Economic Exchanges. Research on China's hydrogen industry policy [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2020.
- [13] 中国汽车工程学会.世界氢能与燃料电池汽车产业发展报告(2021)[R].北京:机械工业出版社,2021.  
China Society of Automotive Engineering. Annual report on global hydrogen fuel cell vehicle(2021). [R]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [14] 衣宝廉.迎接电解水制氢储能高潮[R].北京:中国石油化工有限公司,2020.  
Yi B L. Meet the peak of hydrogen production and energy storage by electrolytic water [R]. Beijing: China Petrochemical Corporation, 2020.
- [15] Kwon H, Ryu M, An S K. Technical & economic study for commercial ships with HFO, LNG and NH<sub>3</sub> as fuel [C]. Orlando: Proceedings of 2019 AIChE Annual Meeting, 2019.
- [16] 国家电投集团氢能产业创新中心.氢能百问[M].北京:中国电力出版社,2022.  
Hydrogen Energy Industry Innovation Center of State Power Investment Corporation Limited. Questions about hydrogen energy [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2022.
- [17] 中国汽车工程学会.世界氢能与燃料电池汽车产业发展报告(2019)[R].北京:机械工业出版社,2019.  
China Society of Automotive Engineering. Annual report on global hydrogen fuel cell vehicle(2019) [R]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [18] 中国氢能联盟.中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2019版)[R].北京:中国氢能联盟,2019.  
China Hydrogen Alliance. White paper on China's hydrogen energy and fuel cell industry(2019) [R]. Beijing: China Hydrogen Alliance, 2019.
- [19] 邵志刚,衣宝廉.氢能与燃料电池发展现状及展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):469-477.  
Shao Z G, Yi B L. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 467-477.
- [20] 孙柏刚,包凌志,罗庆贺.缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势[J].汽车安全与节能学报,2021,12(3):265-278.  
Sun B G, Bao L Z, Luo Q H. Development and trends of direct injection hydrogen internal combustion engine technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(3): 265-278.
- [21] Tarasenko A B, Kiseleva S V, Popel O S. Hydrogen energy pilot introduction—Technology competition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(23): 11991-11997.
- [22] 汪颖异,魏梅.绿色低碳燃料船舶总拥有成本分析[J].船舶,2021,32(5):10-16.

- Wang Y Y, Wei M. Analysis of total cost of ownership for green low carbon ships [J]. *Ship & Boat*, 2021, 32(5): 10–16.
- [23] 俞红梅, 衣宝廉. 电解制氢与氢储能 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3): 58–65.
- Yu H M, Yi B L. Hydrogen for energy storage and hydrogen production from electrolysis [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(3): 58–65.
- [24] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 146–152.
- Yu H M, Shao Z G, Hou M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(2): 146–152.
- [25] 吴朝玲, 李永涛, 李媛, 等. 氢气储存和输运 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- Wu C L, Li Y T, Li Y, et al. Hydrogen storage and transportation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- [26] Klebanoff L E, Pratt J W, Leffers C M, et al. Comparison of the greenhouse gas and criteria pollutant emissions from the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry with a diesel ferry [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 54: 250–268.
- [27] Tong L, Yuan Y P, Yang T Q, et al. Hydrogen release from a metal hydride tank with phase change material jacket and coiled-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(63): 32135–32148.
- [28] 赵琳, 张建星, 祝维燕, 等. 液态有机物储氢技术研究进展 [J]. *化学试剂*, 2019, 41(1): 47–53.
- Zhao L, Zhang J X, Zhu W Y, et al. Research progress of hydrogen storage technology for liquid organic matter [J]. *Chemical Reagents*, 2019, 41(1): 47–53.
- [29] 严新平, 徐立, 袁成清. 船舶清洁能源技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- Yan X P, Xu L, Yuan C Q. Clean energy techniques for ships [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [30] Yuan Y P, Wang J X, Yan X P, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 1–12.
- [31] 李峰, 袁裕鹏, 严新平, 等. 燃料电池船舶舱内氢气泄漏数值模拟研究 [J]. *交通信息与安全*, 2017, 35(6): 60–66.
- Li F, Yuan Y P, Yan X P, et al. A study on numerical simulation of hydrogen leakage in cabin of fuel cell ship [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2017, 35(6): 60–66.