

DOI: 10.19666/j.rlfed.202302028

海上风电制氢与氢能动力船舶应用综合场景 设计与经济性分析

孙百洵¹, 杨国刚¹, 刘新宇¹, 王 皓¹, 李 悦², 王人洁²

(1.大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;

2.交通排放控制监测技术实验室, 北京 100084)

[摘 要] 节能减排受到广泛关注, 加快低碳转型工作也在航运业内达成共识, 其中氢能船舶具有较好的发展前景, 迫切需要为氢能船舶找到稳定的氢源。介绍了海上风电制氢和氢能船舶的发展现状, 打破传统的氢能概念, 提出了海上平台制氢、海上加氢的系统架构, 利用海上风电直接制备氢气, 为解决氢能船舶的氢源问题以及实现海上风电消纳提供了新思路。通过对海上风电与海洋牧场氢能船舶融合发展的场景进行讨论和经济性分析发现: 海上风电与海洋牧场氢能船舶融合发展具有经济可行性, 且将为碳减排工作做出贡献, 有较好的发展前景。该研究可为我国海上风电和氢能船舶的综合发展提供参考, 并对我国沿海地区构建海上氢能走廊提出展望。

[关 键 词] 海上风电; 海洋牧场; 氢能船舶; 经济性分析

[引用本文格式] 孙百洵, 杨国刚, 刘新宇, 等. 海上风电制氢与氢能动力船舶应用综合场景设计与经济性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 26-31. SUN Baixun, YANG Guogang, LIU Xinyu, et al. Integrated application design and economic analysis of hydrogen production by offshore wind power offshore and hydrogen powered ship[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 26-31.

Integrated application design and economic analysis of hydrogen production by offshore wind power offshore and hydrogen powered ship

SUN Baixun¹, YANG Guogang¹, LIU Xinyu¹, WANG Hao¹, LI Yue², WANG Renjie²

(1.College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2.Laboratory of Transport Pollution Control and Monitoring Technology, Beijing 100084, China)

Abstract: Energy conservation and emission reduction work have attracted global attention. Accelerating low-carbon transformation work has also reached a consensus in the shipping industry. Among them, hydrogen energy ships have good development prospects. In the face of the problem that hydrogen energy ships have no stable hydrogen source, it is urgent to find a stable hydrogen source for hydrogen energy ships. This paper introduces the development status of hydrogen production from offshore wind power and hydrogen energy ships, breaks the traditional concept of hydrogen energy, puts forward the system architecture of hydrogen production and hydrogenation on offshore platforms, and uses offshore wind power to directly prepare hydrogen, which provides a new idea for solving the hydrogen source problem of hydrogen energy ships and realizing the consumption of offshore wind power. Through the discussion and economic analysis of the integrated development of offshore wind power and marine ranching hydrogen energy ships, it is found that the integrated development of offshore wind power and marine ranching hydrogen energy ships is economically feasible, will contribute to carbon emission reduction work, and has good development prospects. This paper can serve as a reference for the comprehensive development of offshore wind power and hydrogen ships and put forward the prospect of building offshore hydrogen energy passage in coastal areas.

Key words: offshore wind power; marine ranch; hydrogen energy vessels; economic analysis

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 交通排放控制监测技术实验室开放基金资助 (Z2209-030)

Supported by: Laboratory of Transport Pollution Control and Monitoring Technology (Z2209-030)

第一作者简介: 孙百洵 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为燃料电池船舶, 1120221199@dlmu.edu.cn。

通信作者简介: 杨国刚 (1972), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为燃料电池船舶, yanggg@dlmu.edu.cn。

节能减排工作已经受到广泛关注,解决环境污染也已达成了国际共识。交通运输行业的能耗是造成环境污染的重要因素,航运业必须加快低碳转型,大力发展新能源船舶。氢能船舶是未来船舶运输行业发展的一个重要方向。但是氢燃料电池船舶在实际应用过程中仍然存在一些问题,例如氢能船舶的氢源问题。恰好我国海上风电的发展十分迅速,大量海上风电的消纳也成为一个问题。因此,打破传统氢能概念,利用海上风电直接制备氢气,不仅可以解决海上风电的消纳问题,还可以解决氢能船舶的氢源问题,可谓是一举两得。另外,我国沿海地区分布着许多海洋牧场和港口,其中海洋牧场工作船舶具有定期定线的工作特点,可作为氢能船舶的试运行场景,有利于氢能船舶的推广。

1 氢能船舶和海上风电发展现状

近年来,我国在新能源和清洁能源船舶领域做出很多尝试,新能源船舶受到国内航运业广泛关注,其中氢能作为清洁无污染的新型能源,其能量密度高,且与空气反应只生成水,被认为是一种理想的替代能源,可作为未来世界能源的终极解决方案。

1.1 氢能船舶发展概况

氢燃料电池起初应用于汽车,但其更适用于敞开、清洁环境,故氢燃料电池更适用于船舶。氢能作为一种具有清洁低碳、灵活高效、应用场景丰富等优点的二次能源,被视为最理想的能源载体^[1-3]。

当前,全球对发展氢能工业高度关注^[4-7],其中美国和日本等发达国家更是把发展氢能作为国家能源发展的重要战略,并制订了具体的发展方案。氢能船舶目前多用于内河、近海的小型船舶,一些发达国家已经成功建造不同类型的氢能船舶,如液态氢为燃料的“Topoka”零排放滚装船^[8]、全球首艘零排放氢燃料电池动力试验船“ZEUS”^[9]以及德国的“Alsterwasser”游船^[10]。

我国氢能产业的发展起步相对较晚,但在一系列政策引导和经费支持下,一大批氢能产业项目也已日渐成熟。尤其在2022年,船用氢燃料电池行业进展颇丰,中国船级社于2022年6月15日向国家电投氢能技术开发有限公司颁发了FCPS-S120船舶用氢燃料电池系统的型式认证^[11-12],这是我国首个获得型式认证的船舶氢燃料电池发电系统。2022年,由三峡集团长江电力与中国船舶集团第七一二研究所合作研发建造的“三峡氢舟1号”^[13-15],是我国氢

能船舶行业最大的突破。该船是我国首艘500 kW内河氢燃料电池动力船,已成功完成合拢,建成后将主要用于三峡库区及两坝间交通、巡查、应急等工作。

氢能船舶是未来船舶运输行业发展的一个重要方向。但是氢燃料电池船舶的氢源与储氢问题,影响了氢能船舶的续航能力,如果想要达到一定要求的续航能力,就要增加储氢瓶的数量,这样不仅会导致储氢瓶所占的体积和质量增加,还会增加整艘氢燃料电池船舶的成本。由于目前加氢站均建在陆地上,氢能船舶的续航能力较低,影响船舶的正常工作,所以当务之急是解决氢能船舶的氢源问题。

1.2 海上风电产业发展现状

在新能源发展过程中,风力发电以其建设周期短、环境要求低、储量丰富、利用率较高等优点,在全球范围内迅速发展^[16-17]。海上风电是风电发展的一个新方向,我国可开发的海洋风能资源丰富,大约为750 GW^[18-19]。海上风电主要是指近海风电,不同于陆地风电的是:它不占用土地,风速高,湍流强度小,风电机组发电量大,可以忽略噪音和视觉的影响^[20]。海上风电制氢可作为氢能船舶稳定的氢能来源。

目前,在世界范围内,我国海上风电装机容量占全球的45%。在2022年上半年,我国海上风电容量新增5.1 GW,截至2022年9月底,我国海上风电累计装机2726万kW。山东、海南、浙江、辽宁、江苏等省份的部分海上风电项目开发建设完毕,其中江苏省是当前项目经济性最好的省份。

我国海上风力资源丰富、开发潜力巨大,为保障能源安全,推动绿色低碳发展,实现“双碳”战略的实现,发挥着重要作用。“十四五”期间,我国规划的海上风电总装机量已经超100 GW^[21-22]。2022年3月22日国家发展改革委、国家能源局发布的《“十四五”现代能源体系规划》提出^[23],大力发展非化石能源,鼓励大力发展海上风电场,推动沿海地区海洋风力资源的开发。

陆地上的风力起伏不定,而海上风力相对稳定,因此,海上风电机组的发电时间更长,发电量更多。大量海上风力发电投入使用后,如何处理其并网与消纳问题,已成为亟待解决的问题。随着氢能技术的发展,尤其是制氢、储氢技术的不断发展,新的制氢技术如风电制氢技术,已经逐渐成熟,具有工业化的基础。因此,打破常规的氢能源观念,

采用海上风电生产氢气,实现海上风电跨越电力输送的阶段,是实现海上风电与氢能船舶一体化发展切实可行的途径。

1.3 海上风电制氢发展现状

海上风电是实现减碳目标的重要抓手^[24]。海上风电制氢是一个具有巨大创新潜力的前瞻性方案,既能在一定程度上解决海上风电的难题,又能以水电解制氢提供清洁绿色的能源^[25]。丹麦公用事业公司的 Orsted 项目装机容量为 2 MW,每天生产多达 1 000 kg 的氢气,这些氢气将用于哥本哈根及周边地区的道路交通。

2022 年 8 月 31 日,明阳阳江青州四海上风电工程作为我国首批海上风电平价示范项目正式开工^[26],装机总容量为 500 MW,位于阳江市阳西县沙扒镇的一处沿海地区。正式建成投产后,每年可为电厂提供约 18.3 亿 kW·h 的清洁能源电力,相当于燃煤电厂的 57 万 t 标准煤,每年减排二氧化硫 1.1 万 t,减排二氧化碳 140 万 t。该工程将成为国内第一个“海上风电+海洋牧场+海水制氢”综合工程^[27]。

2 海上风电与氢能船舶综合场景设计及经济性分析

2.1 综合场景设计

英国 Dolphin 项目计划开发了将制氢所需的整套系统集成到浮式风机平台上的漂浮式风电场^[28],Gondal 曾对大规模的海上风电制氢平台进行相应的研究^[29]。在海上风电场海上平台建造一座海上加氢站,采用海上风电制氢+海上加氢的方式,将制取的氢气供给附近海洋牧场工作的氢能船舶,海洋牧场的工作船舶改用以海上风电场制取的氢气为燃料的氢能船舶,可以减少柴油机排放的废气。海洋牧场的工作船早上利用动力电池系统提供的动力行驶至海上平台加氢站加氢,随后前往工作区域工作,在燃料用尽之前返回海上加氢站加氢即可,不需要频繁的返回岸边加氢,在一天的工作结束后返回岸边,夜间通过充电桩充电。

海上平台制氢海上加氢系统如图 1 所示,主要由海上风电场、海上换流站、海上制氢站、储氢系统、加氢系统组成。海上风机输出交流电,经内部升压单元升至 33 kV,然后通过海上换流站转换成制氢系统所需要的直流电制氢,制取的氢气通过氢气压缩机压缩至 45 MPa,储存在储氢系统内,再通过加氢机为船舶充能。

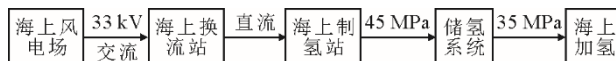


图 1 海上平台制氢海上加氢系统

Fig.1 Offshore platform hydrogen production and offshore hydrogen refuelling systems

2.2 综合场景经济性分析

2.2.1 海上加氢站年均成本估算

假设 1 座海上加氢站每日制氢 1 000 kg,耗电约为 58 000 kW·h,仅需 5 MW 风机每天发电量的 50%即可满足供电。海上风电场制氢成本主要由海上换流站(33 kV)、制氢系统、氢气压缩机、氢气瓶、加氢系统以及安装成本组成。海上加氢站成本估算见表 1,其中制氢系统包括海水淡化装置和电解水制氢装置,加氢系统包含加氢机、氢气管道系统、放散系统、置换吹扫系统、仪表风系统、安全监控系统以及其他的管路材料等^[30]。

表 1 海上加氢站成本估算

Tab.1 Cost estimates for offshore hydrogen refuelling stations

设备	单位成本	总成本/万元
海上换流站(33 kV)	200 万元/MW	500
制氢系统	200 万元/MW	500
氢气压缩机	300 万元/台	600
氢气瓶及加氢系统成本	574 万元	574
安装成本	241 万元	241
总计		2 415

海上换流站(33 kV)以及制氢系统的单位成本均为 200 万元/MW,氢气压缩机需要 2 台额定排气压力为 45 MPa,氢气压缩量为 500 kg/d 的隔膜式压缩机,氢气瓶采用 45 MPa 储气瓶式容器组,加氢系统需要 4 台 35 MPa 加氢机,安装成本按照总成本的 10%估算,海上加氢站初始成本约为 2 415 万元。

海上加氢站建设的年均成本按照 15 年进行折旧计算,不考虑残值,人工成本按每年 100 万计算,维护成本等其他运营成本总和等于人工成本,电解水制氢用电成本作为船舶燃料成本计算,不在此部分计算。海上加氢站年均成本计算公式为:

$$C_a = C_d + C_p + C_o \quad (1)$$

式中: C_a 为加氢站年均成本,万元/a; C_d 为建设成本的年折旧成本,万元/a; C_p 为年人工成本,万元/a; C_o 为年运营及其他成本,万元/a。1 座日供氢 1 000 kg 的海上加氢站年均成本估算见表 2。

表 2 海上加氢站年均成本估算
Tab.2 Estimated average annual cost of an offshore hydrogen refuelling station

项目	成本/(万元·a ⁻¹)
建设成本的年折旧成本	161
人工成本	100
运营及其他成本	100
总计	361

2.2.2 氢燃料电池船舶年均成本估算

传统柴油燃料海洋牧场养殖船和休闲渔船基本参数见表 3。氢能船舶的设计参数除续航里程外均保持一致，即采用氢燃料电池与锂电池双动力系统，氢燃料电池系统为主动力系统。1 座日供氢 1 000 kg 的海上加氢站可满足 30 艘养殖船、15 艘休闲渔船的氢气需求。

表 3 海洋牧场养殖船和休闲渔船基本参数
Tab.3 Parameters for farm boats and recreational fishing boats

项目	养殖船	休闲渔船
航速/节	9	10
船长/m	10.00	13.50
船宽/m	2.85	3.50
吃水/m	0.59	0.73
发动机功率/kW	16.00	60.00
续航里程/km	170.00	185.00

海洋牧场养殖船与休闲渔船的设计方案见表 4。由表 4 可见，海洋牧场养殖船燃料电池系统功率 20 kW，休闲渔船燃料电池系统功率 75 kW，兼顾发电与顶浪性能，运行时按 80%性能输出，可满足 9 节航速运行。养殖船动力电池容量为 20 kW·h，休闲渔船动力电池容量为 80 kW·h。动力电池容量设计原则为可单独作为能源供应船舶在额定功率下运行超过 1 h，且可补充顶浪航行所需功率，并作为电控阀门等设备的备用电源。35 MPa 的气瓶储氢密度约为 20~22 g/L，140 L、35 MPa 的气瓶储氢量约为 3 kg。续航里程为船舶在额定功率下可持续行驶的里程数。

表 4 氢能船舶设计方案
Tab.4 Hydrogen ship design scheme

项目	养殖船参数	休闲渔船
燃料电池系统功率/kW	20	75
动力电池容量/(kW·h)	20	80
额定功率/kW	16	60
氢气瓶压力/MPa	35	35
碳纤维瓶容积/L	140	140
碳纤维瓶数量	2	8
氢气存储量/kg	6	24
续航里程/km	95	110

假设一艘传统燃料的养殖船建造成本为 50 万元、一艘传统燃料的休闲渔船建造成本为 100 万元，氢能船舶的建造成本按传统燃料船舶成本的 1.4 倍计算，分别为 70 万元、140 万元。船舶建造的年折旧成本按照 20 年进行折旧计算，不考虑残值，其他成本包括每年的运营、维护成本按建造成本的 5% 计算，电价按 0.20 元/(kW·h) 计算，每年工作时间若按 300 天计算，传统柴油船舶每年需要约 918 t 柴油，柴油价格参考 2022 年 12 月 3 日北京地区 8.05 元/L。不同燃料船舶年均成本计算公式为：

$$C_t = C_D + C_e + C_b \quad (2)$$

式中： C_t 为不同燃料船舶年均成本，万元/a； C_D 为船舶建造年折旧成本，万元/a； C_e 为年燃料成本，万元/a； C_b 为年其他成本，万元/a。海洋牧场采用不同燃料船舶的年均成本见表 5。

表 5 不同燃料船舶年均成本比较 单位：万元/a
Tab.5 Comparison of average annual costs of ships with different fuels

项目	柴油机船舶	氢能船舶
船舶建造年折旧成本	150.0	210.0
燃料成本	869.4	348.0
其他成本	150.0	210.0
年均成本	1 169.4	768.0

采用柴油机船舶不需要新建加油站，使用柴油机船舶的年均成本即为 1 169.4 万元，采用氢能船舶的年均成本包括前期投资建造海上加氢站的年折旧成本总计 1 129 万元，传统柴油机船舶与氢能船舶年均成本对比如图 2 所示。由图 2 可见，传统柴油机船舶燃料成本占年均成本很大一部分，而氢能船舶则需要大量的初始投资，且当电价按 0.20 元/(kW·h) 计算时，氢能船舶的年均成本要低于传统柴油机船舶。

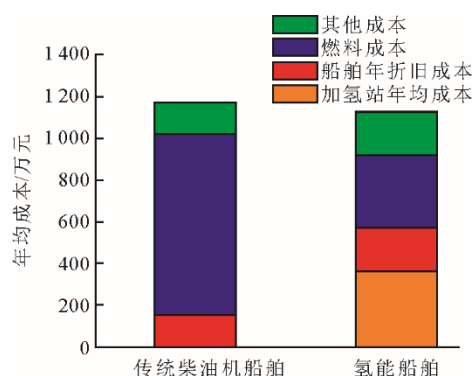


图 2 传统柴油机船舶与氢能船舶年均成本对比
Fig.2 Average annual cost of a conventional diesel ship versus a hydrogen ship

不同电价情况下以及政府对氢能船舶进行不同补贴情况下的传统柴油机船舶与氢能船舶年均成本如图 3、图 4 所示。由图 3 可以看出, 如果电价为 0.22 元/(kW·h), 采用氢能船舶的年均成本和柴油机船舶的年均成本持平, 具有经济可行性。氢能船舶主要成本集中在初期建设成本上, 随着技术的发展, 建设成本会继续下降, 未来经济性优势会更强。

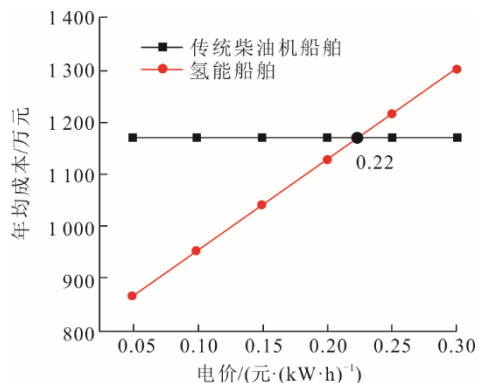


图 3 电价对船舶年均成本的影响

Fig.3 The impact of electricity prices on the average annual cost of a ship

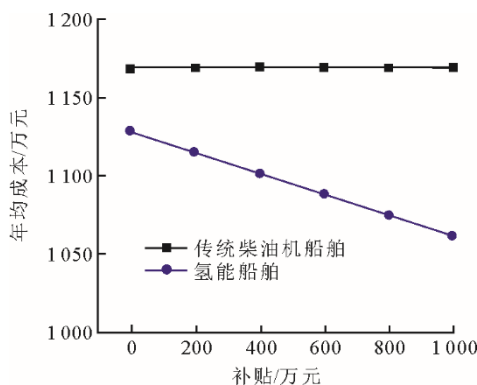


图 4 补贴金额对船舶年均成本的影响

Fig.4 Impact of the subsidy amount on the average annual cost of the vessel

由图 4 可见, 随着政府补贴金额的增加, 氢能船舶的年均成本降低, 氢能船舶用户将得到增加。综上, 海上风电和氢能船舶综合应用场景具有经济可行性, 利用海上风电制氢, 可以很好解决氢源问题和海上风电消纳问题, 具有很好的发展前景。

3 结 语

本文介绍了海上风电和氢能船舶的发展现状, 并对海上风电和氢能船舶综合发展进行讨论和经济性分析。利用海上风电制氢, 不仅可以同时解决氢源问题和海上风电消纳问题, 而且具有经济可行性, 有较好的发展前景。1 座海上加氢站每年可以

节约超过 900 t 柴油, 可以减少大约 2 800 t 的二氧化碳排放。以我国重点港口群为发展对象, 依托我国的沿海航线, 兼顾其他城市省际氢能船舶的加氢需求, 可构建 1 条海上氢能船舶走廊, 如果可以在沿海区域建造 100 座日供氢 5 000 kg 的海上加氢站, 每年可以节约超过 45 万 t 柴油, 减少 140 万 t 左右的二氧化碳排放。

【参考文献】

- [1] 杨发财, 李世安, 沈秋婉, 等. 绿色航运发展趋势和燃料电池船舶的应用前景[J]. 船舶工程, 2020, 42(4): 1-7. YANG Facai, LI Shian, SHEN Qiuwan, et al. Development trend of green shipping and application prospect of fuel cell ships[J]. Ship Engineering, 2020, 42(4): 1-7.
- [2] 李建林, 李光辉, 郭丽军, 等. “十四五”规划下氢能应用技术现状综述及前景展望[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 10-16. LI Jianlin, LI Guanghui, GUO Lijun, et al. Overview and prospect of hydrogen energy application technology under the 14th five year plan[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(6): 10-16.
- [3] 上海市节能协会专家委员会. 上海氢能产业实践与发展研究[J]. 上海节能, 2021(8): 797-805. Shanghai Municipal Energy Conservation association professional committee. research on practice and development of hydrogen energy industry in Shanghai[J]. Shanghai Energy Conservation, 2021(8): 797-805.
- [4] 蒋敏华, 肖平, 刘入维, 等. 氢能在我国未来能源系统中的角色定位及“再电气化”路径初探[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 1-9. JIANG Minhua, XIAO Ping, LIU Ruwei, et al. The role of hydrogen energy in China's future energy system and preliminary study on the route of re-electrification[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 1-9.
- [5] 韩笑, 张兴华, 闫华光, 等. 全球氢能产业政策现状与前景展望[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 27-34. HAN Xiao, ZHANG Xinghua, YAN Huagang, et al. Current situation and prospect of global hydrogen energy industry policy[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12): 27-34.
- [6] LI Z, ZHANG W, ZHANG R, et al. Development of renewable energy multi-energy complementary hydrogen energy system (a case study in China): a review[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2020, 38(529): 01445987 2095351.
- [7] 孟翔宇, 顾阿伦, 郭新国, 等. 中国氢能产业高质量发展前景[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 77-93. MENG Xiangyu, GUAlun, WU Xinguo, et al. Prospect of high quality development of hydrogen energy industry in China[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14): 77-93.
- [8] WILHELMSSEN. Topeka's hydrogen vessels one step closer to reality[EB/OL]. (2021-12-07) [2022-04-14]. <https://www.wilhelmsen.com/media-news-andevents/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] 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.
- [11] 薛龙玉. CCS 助推国内船用氢燃料电池技术取得新突破[J]. *中国船检*, 2022(9): 26-29.
XUE Longyu. CCS boosts new breakthrough in domestic marine hydrogen fuel cell technology[J]. *China Ship Survey*, 2022(9): 26-29.
- [12] 陈俊杰, 贾建雄, 肖婷. 国内首台百千瓦级船用氢燃料电池发电系统获 CCS 认证[N]. *中国水运报*, 2022-06-20(002).
CHEN Junjie, JIA Jianxiong, XIAO Ting. China's first 100-kilowatt-class marine hydrogen fuel cell power generation system certified by CCS[N]. *China Water Transport News*, 2022-06-20(002).
- [13] 胡杰鑫, 王琮, 杨玉婷, 等. 船用氢能标准发展现状与展望[J]. *船舶标准化与质量*, 2021(3): 2-7.
HU Jiexin, WANG Cong, YANG Yuting, et al. Development status and prospect of marine hydrogen energy standards[J]. *Shipbuilding Standardization & Quality*, 2021(3): 2-7.
- [14] 国内首艘氢燃料电池动力工作船正式转入建造阶段[J]. *上海节能*, 2022(5): 601.
China's first hydrogen fuel cell-powered workboat officially turns into construction phase[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2022(5): 601.
- [15] 吕龙德, 熊莹. 船舶动力路径从常规燃料到低碳零碳排放[J]. *广东造船*, 2021, 40(6): 4-11.
LYU Longde, XIONG Ying. Ship power pathways from conventional fuels to low and zero carbon emissions[J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2021, 40(6): 4-11.
- [16] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势[J]. *东北电力大学学报*, 2016, 36(2): 7-13.
LIU Bo, HE Zhijia, JIN Hao. Wind power status and development trends[J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2016, 36(2): 7-13.
- [17] 纪志国. 我国风电产业现状与发展趋势探究[J]. *中国设备工程*, 2020(18): 217-218.
JI Zhiguo. Exploring the current situation and development trend of China's wind power industry[J]. *China Plant Engineering*, 2020(18): 217-218.
- [18] ZHAO X G, REN L Z. Focus on the development of offshore wind power in China: has the golden period come[J]. *Renewable Energy*, 2015, 81: 644-657.
- [19] 李昊璋, 刘苹元, 王锦鸿, 等. 我国风电产业的发展现状分析及未来展望[J]. *机电信息*, 2020(21): 91-94.
LI Haozhang, LIU Pingyuan, WANG Jinhong, et al. Analysis of the development status of China's wind power industry and future prospects[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2020(21): 91-94.
- [20] 赵靛. 我国各地“十四五”海上风电开发规模目标统计[J]. *风能*, 2022(6): 44-46.
ZHAO Liang. Statistics on the scale of offshore wind power development target in China's 14th Five-Year Plan[J]. *Wind Energy*, 2022(6): 44-46.
- [21] 郭宇. 海上风电全面启动行业前景可观[N]. *中国工业报*, 2022-03-31(002).
GUO Yu. Offshore wind power in full swing: industry outlook promising[N]. *China Industry News*, 2022-03-31(002).
- [22] 孙丽平, 易晓亮, 宋子恒. 我国海上风电发展面临的挑战和相关建议[J]. *中外能源*, 2022, 27(11): 30-35.
SUN Liping, YI Xiaoliang, SONG Ziheng. Challenges and suggestions for development of offshore wind power in China[J]. *Sino-Global Energy*, 2022, 27(11): 30-35.
- [23] 周伏秋. 现代能源体系视角下的电网制度建设[J]. *电气时代*, 2022(6): 20-21.
ZHOU Fuqiu. The construction of grid system in the perspective of modern energy system[J]. *Electric Age*, 2022(6): 20-21.
- [24] 王峰, 遂鹏, 张清涛, 等. 海上风电制氢发展趋势及前景展望[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(5): 41-48.
WANG Feng, LU Peng, ZHANG Qingtao, et al. Development trend and prospects of hydrogen production from offshore wind power[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(5): 41-48.
- [25] 吴瑾, 焦文强, 田倩, 等. 海洋氢能发展现状综述[J]. *科技风*, 2021(19): 129-131.
WU Jin, JIAO Wenqiang, TIAN Qian, et al. A review of the current status of marine hydrogen energy development[J]. *Science and Technology Wind*, 2021(19): 129-131.
- [26] 龙船风电网. 500 MW 海上风电项目! 海上全面施工启动[EB/OL]. (2023-01-06) [2022-09-02] https://baijiahao.baidu.com/s?id=174284668_9096586110&wfr=spider&for=pc.
Longboat Wind Power Grid. 500 MW offshore wind project! Full-scale construction starts offshore [EB/OL]. (2023-01-06) [2022-09-02] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1742846689096586110&wfr=spider&for=pc>.
- [27] 全国首个“海上风电+海洋牧场+海水制氢”融合项目在广东动工[J]. *上海节能*, 2022(9): 1225.
China's first "offshore wind power + marine pasture + seawater hydrogen production" integration project starts construction in Guangdong[J]. *Shanghai Energy Saving*, 2022(9): 1225.
- [28] DOHYUNG J, KILWON K, KYONG H K, et al. Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation for green hydrogen production using offshore wind power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022(263): 115695.
- [29] GONDALI A. Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2019, 3(6): 1468-1489.
- [30] 李妍, 常皓明, 林世响, 等. 外供氢与现场制氢加氢站的氢气成本分析[J]. *煤气与热力*, 2022, 42(3): 26-29.
LI Yan, CHANG Haoming, LIN Shihong, et al. Hydrogen cost analysis of external hydrogen supply and on-site hydrogen production refueling station[J]. *Gas & Heat*, 2022, 42(3): 26-29.

(责任编辑 杨嘉蕾)