

引用格式:金子儿,王子缘,李亚杰,等.我国海上风电制氢产业发展现状、问题与展望[J].南方能源建设,xxxx,x():1-9. JING Z E, WANG Z Y, LI Y J, et al. Development status, problems and prospects of offshore windhydrogen production industry in china [J]. Southern energy construction, xxxx, x(): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-231.

我国海上风电制氢产业发展现状、问题与展望

金子儿^{1,✉}, 王子缘¹, 李亚杰², 王莹², 张佳鑫³, 陈雪鑫⁴, 段凌婕¹

- 佛山环境与能源研究院, 广东 佛山 528000;
- 中国船舶集团风电发展有限公司, 北京 100080;
- 广东省技术经济研究发展中心, 广东 广州 510070;
- 广东省能源研究会, 广东 广州 510070)

摘要: [目的]近年来,在“双碳”政策的不断推动下,海上风电制氢作为绿氢制备的重要技术在我国取得长足发展。文章对我国海上风电制氢产业技术路径、发展现状和问题挑战进行总结,并在此基础上提出相关对策和建议,旨在为未来我国海上风电应用和布局提供思路。[方法]通过调查国内外海上风电制氢产业关键技术研发进展情况,从海上风电制氢系统、电解水制氢技术和海上氢储运方式三个方面出发,分析不同技术路径的研发进展及限制因素;调查当前产业整体发展现状,从政策规划、市场格局、技术路线等方面进行梳理,分析产业当前发展优势及制约因素。[结果]分析当前布局可知,海上风电制氢产业市场格局和技术路线呈现多元化发展趋势,对绿氢产业的发展具备增益效果并推动电解槽产能持续提升。然而核心技术待突破、关键部件依赖进口、周期成本高以及监管保障政策待完善等问题也成为制约产业发展的重要因素。[结论]在积极发展海上风电制氢产业的过程中应警惕隐患和瓶颈约束,从政策标准、产业布局、核心技术等多角度出发,科学谋划,合理布局,推动海上风电与氢能产业发展,助力实现我国“双碳”目标。

关键词: “双碳”目标; 海上风电; 绿氢; 制氢; 制氢成本

中图分类号: TK91; F426.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2025)

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-231

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Development Status, Problems and Prospects of Offshore Wind Hydrogen Production Industry in China

JIN Zier^{1,✉}, WANG Ziyuan¹, LI Yajie², WANG Ying², ZHANG Jialuan³, CHEN Xueluan⁴, DUAN Lingjie¹

- Foshan Institute of Environment and Energy Technology, foshan 528000, Guangdong, China;
- China Shipbuilding Group Wind Power Development Co., Ltd., Beijing 100080, China;
- Guangdong R & D Center for Technological Economy, Guangzhou 510070, Guangdong, China;
- Guangdong Energy Research Society, Guangzhou 510070, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In recent years, under the continuous promotion of carbon peaking and carbon neutrality policy, offshore wind power hydrogen production has made great progress in China as an important technology for renewable hydrogen production. The article reviews the technological routes, development status and challenges in the offshore wind power hydrogen production industry within China. Based on the analysis, it presents targeted countermeasures and recommendations, aiming to provide a foundation of insights and references for the future application and advancement of offshore wind power in the region. [Method] Through an investigation of the research and development progress in offshore wind power hydrogen production technologies both domestically and internationally, the technological advancements and constraints were analyzed across three key dimensions: offshore wind-to-hydrogen systems, electrolytic

收稿日期: 2024-07-12 修回日期: 2024-10-07

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目“有序阵列电极的双界面调控及大电流电解水制氢”(2023B1515120043)

hydrogen production technologies, and offshore hydrogen storage and transportation solutions. By evaluating the current overall development status of the industry, the current development advantages and constraints of the industry were analyzed from the aspects such as policy frameworks, market structures, and technological pathways. [Result] The analysis highlights the existing strengths and development constraints of the industry. Notably, the industry demonstrates a diversified development trajectory, positively influencing the renewable hydrogen sector and promoting continuous advancements in electrolyzer capacity. Nonetheless, several critical challenges persist, including the absence of breakthroughs in core technologies, dependence on imported key components, elevated life cycle costs, and gaps in regulatory and policy support. These factors collectively represent significant barriers to the sustained growth and advancement of the offshore wind-powered hydrogen production industry. [Conclusion] It is concluded that in the process of actively developing the offshore wind power hydrogen industry, the hidden bottleneck constraints should be guarded against, from the perspective of policy standards, industrial layout, core technology, etc., China should scientifically design and reasonably layout, to promote the development of the combination of offshore wind power and hydrogen industry, and to help achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality; offshore wind; renewable hydrogen; hydrogen production; hydrogen production costs
 2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在我国“双碳”目标的大背景下,氢能作为一种清洁、高效的二次能源,来源广泛,应用场景丰富,可用于储能、发电、发热等,被认为是支撑可再生能源大规模发展的理想能源载体^[1]。继2022年我国《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》发布以来,氢能已成为我国新型能源体系建设的重点布局产业,对于加速推进我国各领域绿色低碳化转型具有重要意义^[2]。近年来,海上风电由于风能利用率高、不占用陆地面积、靠近消纳中心等优点,成为我国沿海省份利用可再生能源的重点方式^[3]。2023年我国累计海上风电装机容量达到3700万kW,连续多年位居全球首位,全球占比达一半左右^[4]。然而,海上风电因存在间歇性、波动性等特性,对电力系统安全稳定运行具有挑战性,增加了并网难度^[3]。在我国海上风电与氢能共同发展背景下,海上风电制氢作为未来绿氢制备的主力军之一,对于解决风电并网难题,促进风电消纳利用具有重要意义。海上风电与制氢产业相融合是未来海上风电可持续发展的重要发展方向,具备良好推广应用前景。

1 关键技术发展现状

1.1 海上风电制氢系统

目前,海上风电制氢主要有海上和陆上电解水制氢两种系统配置。其中,海上系统配置由海上风电场、海上电解槽和陆上储用氢设施组成^[5](见图1),

可细分为海上集中式电解水制氢及分布式电解水制氢两种方式。集中式电解水制氢是将风力涡轮机组产生的电力汇集到海上平台进行电解水制氢,氢气经船舶或输氢管道传输至岸上。此种制氢系统能利用现有海上油气平台和管道且不受水深限制,具备项目总体投资成本低、无需建设海上升压站等优势,适合发展深远海大规模风电制氢。目前已在荷兰NorthH2、瑞典HT1等多个海外项目中实现规划应用^[6],是未来我国海上制氢产业发展的重要方向。海上分布式电解水制氢则在每台风电机组塔底平台上都安装模块化的制氢设备,在风电机组侧制氢并将氢气汇集后再通过主管道压缩传输至岸上,具备电力运输成本低、损耗低等特点,目前在英国、德国均有相关应用^[6]。但由于风机平台空间狭小,对海底管道依赖性强,受海上气候复杂多变因素影响故障率相对更高,其维护成本过高,目前仍存在较大优化空间^[7]。

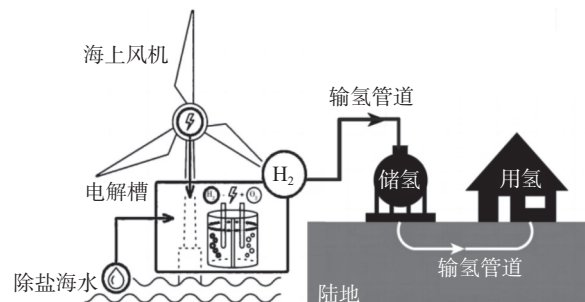


图1 海上电解水制氢系统架构图

Fig. 1 Architecture of offshore electrolytic water hydrogen production system

陆上电解水制氢系统配置的区别在于电解槽位于岸上(见图 2), 此种系统配置中产生的盈余电力可以选择出售给电网或在低电价期间从电网购买电力生产氢气, 对可再生能源波动性适应能力高^[5]。但电缆在传输过程中能量损耗明显, 且发电机与岸边的距离将导致损耗呈倍数上升。在我国不断向深水乃至超深水平台建设的趋势下, 电力损耗成本将成为限制陆上制氢系统大规模发展的重要因素。

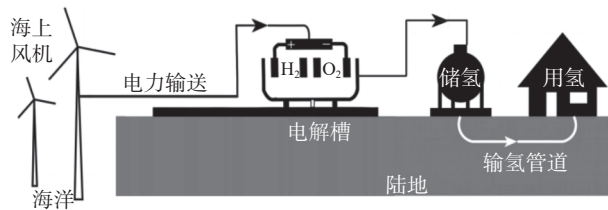


图 2 陆上电解水制氢系统架构图

Fig. 2 Architecture of onshore electrolytic water hydrogen production system

1.2 电解水制氢技术路线

海上制氢主要有两个技术方向: 一是先把海水变成纯水或预处理再电解制氢, 二是用海水直接电解制氢。目前海水先淡化或预处理再电解制氢的技术相对成熟, 主要包括目前已经实现规模化生产的碱性电解水制氢(ALK)、质子交换膜电解水制氢(PEM), 以及研发阶段的固态氧化物电解水制氢(SOEC)和阴离子交换膜电解水制氢(AEM)四种制氢技术。其中 ALK 和 PEM 技术已广泛应用于陆上风光制氢一体化项目中, 是当前海上风电制氢产业主要使用的两种电解槽技术; SOEC 和 AEM 技术由于关键材料亟待突破、产品性能尚未成熟等问题, 目前暂无示范实证项目。

ALK 电解槽是当前最成熟、应用最广泛的电解水制氢技术。截至 2024 年上半年, 市场上公开单台碱槽最大制氢能力可达 4000 Nm³/h, 产品性能指标比肩国际先进水平, 具有造价成本低、寿命长等优势, 目前已完成商业化进程并占据市场主导地位, 但仍然存在电流密度低、电解能耗高、功率调节范围窄等问题, 同时由于碱性电解槽难以快速地启停和调节负荷, 其与海上风电适配性较差^[1]。PEM 电解槽在我国起步较晚, 但近两年技术装备制造自主化发展迅速, 目前国内公布 PEM 最大单槽制氢规模已达 400 Nm³/h, 正处于商业化验证阶。PEM 电解槽具有

启动迅速、体积小、电流密度高等特点, 且与可再生能源发电适配性强, 被业内认为是未来 5~10 年最主要的发展方向。但需使用含贵金属(铂、铱)的电极催化剂和特殊的膜材料, 导致整体设备成本数倍于 ALK 电解槽价格, 在一定程度上限制了其应用规模。

除传统纯水电解制氢路线外, 利用海水直接电解制氢技术也是近年来发展海上风电制氢的重要技术路径之一。海上风电电解水制氢技术对比如表 1 所示。近年来, 国内研究团队先后在海水电解制氢方面实现突破, 海水制氢技术快速发展, 相关示范项目陆续启动。目前由氢致能源公司研制的 500 kW 电解海水制氢装备已落地深圳能源集团妈湾电厂并正式开展示范应用; 由谢和平院士团队联合东方电气开展的无淡化海水原位直接电解制氢技术海上中试在福建兴化湾海上风电场获得成功示范验证; 除深圳能源集团、东方电气以外, 中石化、中石油、中海油、国家能源集团等央企正下场进军海水制氢, 共同推动该项技术产业化进程。从整体来看, 当前海水直接制氢仍存在制氢效率低、产量不稳定等亟待攻关的难题, 距离实现技术产业化落地应用仍有

表 1 海上风电电解水制氢技术对比

Tab. 1 Comparison of hydrogen production technology from water electrolysis in offshore wind power

制氢技术	碱性电解水制氢	质子交换膜电解水制氢	海水直接电解制氢
技术成熟度	商业化应用	商业化初期	示范验证
电解液类型	氢氧化钾	质子交换膜	氢氧化钾
电流密度 (A/cm ²)	0.2~0.8	1~2	—
直流能耗 (kWh/Nm ³)	4.5~5.5	4.2~5.0	4.3~5.0
最大单槽制氢规模(Nm ³ /h)	1000~4000	400	100
氢气纯度	99.3%~99.9%	99.99%	99.9%
优点	技术成熟度高、成本低	启动迅速、体积小、电流密度高、产品纯度高	无淡化过程和额外能耗, 具备耐受能力
缺点	电流密度低、电解能耗高、功率调节范围窄	设备成本高、催化剂成本高且稀缺	制氢规模小、制氢效率低、产量不稳定、范围窄

一段爬坡路要走。

1.3 海上氢储运方式

对于海底管道输氢,目前我国尚未开展相关示范项目,而欧洲各国已探索开展海底管道运氢示范。其中,德国、瑞典、挪威等陆续启动“海上风电制氢-管道运氢”项目建设;西班牙、葡萄牙和法国在2022年宣布建设连接三国的海底氢气管道项目(H2Med)以响应欧盟提出的氢能发展目标;英国“Dolphyn Hydrogen”项目计划将现有油气管道改造升级以实现氢气输送。但是目前管道输氢大多使用碳钢管材,运输过程中难以避免氢脆、氢致疲劳等管材损伤,未来仍需继续优化提升。此外,海底管道建设还需面临海洋环境的腐蚀性及复杂性带来的工程安全问题、成本高昂等不确定性风险,当前阶段仍面临诸多挑战。

对于船舶运氢,目前主要有气态、液态、有机液态和固态四种储氢技术方案,氢气通过运输船运至码头或氢气转运场地,供陆上应用消纳^[1]。现阶段气态储氢和液态储氢技术相对成熟,其中气态储氢具备结构简单、能耗低、充放氢速度快等特点,我国主要以35MPa III型储氢罐为主,但储氢效率低、安全性较差等问题一定程度上限制了其在船舶运氢领域的进一步发展;而液氢单次储运量约为气态氢储运量的9倍,具有运输成本低、储运压力低和安全性高等优势,因此对于大规模运输具有较高的工程应用价值。日本、韩国和欧洲部分国家已率先开展海上液氢运输船项目研究;国内关于液氢运输船的研究目前处于船型设计阶段,由中国船舶集团第七〇八研究所研发的20000 m³级液氢运输船设计方案已获得美国船级社原则性认可证书,取得突破性进展。然而,在氢液化关键技术领域,我国长期落后国际先进水平,氢膨胀机、正仲氢转化器、液氢容器及其密封件制造等技术瓶颈亟待突破。在有机液态储氢领域,目前国内外仍处于示范验证阶段,应用案例较少,日本千代田公司以甲苯-甲基环己烷为储氢载体实现全球首次氢气海上运输,但由于脱氢能耗高、储氢载体性能欠佳等因素,短时间内难以达到规模化及具备经济性^[8]。而固态储氢由于与船舶适配性欠佳,存在质量能量密度较低,大规模装载局部较重问题,暂无实际应用案例^[9]。

除评估技术本身成熟度及可行性以外,远距离

大规模海上输氢还需兼顾考虑在原有海上制氢平台基础上再扩建储运平台的现实工程难点,其同样是制约我国海上制氢发展的重要因素。

2 产业发展趋势

随着能源行业深入践行习近平总书记生态文明思想,协同推进高质量发展和高水平安全保障,绿色发展不断迈上新台阶。2023年来,各部门围绕我国《氢能产业发展中长期规划》谋划部署的分阶段目标任务,发布了一系列政策文件,在各自领域释放出发展氢能的积极信号,如国家能源局发布《新型电力系统发展蓝皮书》,明确提出推动氢燃料电池汽车替代、可再生能源制氢、电氢转换技术、大规模氢能制备和利用综合示范等重点任务。绿电制氢成为我国可再生能源存储、转运及消纳的重要技术路径,其中风电制氢产业链备受行业关注。

一是海上风电装机量迅速提高以及氢能产业迅速发展为海上风电制氢产业发展奠定了坚实基础。《“十四五”可再生能源发展规划》提出,重点建设山东半岛、长三角、闽南、粤东和北部湾五大海上风电基地,围绕资源富集区协同推进海上风电产业,建设风电装备产业基地^[10],截至目前沿海各省均已推出本省海风规划^[11]。从各省海风规划容量(总共接近200 GW)和推进节奏来看,未来5~10年是国内海风新一轮建设高峰期^[12]。在“双碳”目标引领下,海上风电技术创新、单机规模、深远海发展等方面取得重大突破,全球超60%的风电装备由我国生产,新增装机容量连续多年居世界首位,截至2023年底,海上风电装机规模超3700万kW^[13]。能源产业链绿色化、现代化水平不断提升,为海上风电制氢产业化和场景规模化奠定了坚实的基础。

我国氢能产业发展至今,以交通领域为核心,已初步搭建起“氢储运加用”的全产业链条。截至2023年底,我国氢燃料电池汽车保有量约19000辆,已建成并运营的加氢站数量超420座^[14];同时,氢能应用也从交通领域开始辐射到其它领域,各大能源、化工、钢铁、电气等行业头部企业也相继切入氢能领域,将氢能作为实现绿色低碳转型的重要手段,其中海上风电制氢耦合沿海化工、钢铁、新型储能等领域有巨大的市场前景,对解决海上风电消纳、传统工业领域绿色低碳转型有重要意义。近年来氢能与

燃料电池企业纷纷转型, 往绿氢制储运加等产业链延伸发展, 从关键材料、部件到装备等环节技术和国产化率逐步提高, 产业化态势明显。

二是大型企业加快布局促使海上风电制氢产业链市场格局和技术路线都呈现出多元化发展趋势。市场格局方面, 三股“电解槽装备生产新势力”加入——以金风科技、明阳智能、三一重工为代表的风电材料部件及装备企业(绿电配套供应方)^[15], 以上海重塑、广东清能、北京亿华通为代表的氢燃料电池企业(技术正向开发方), 以电力、航天、船舶等领域国央企(风电资源方)都在推进业务延伸与闭环, 实现产业链整合。因此, 市场格局正在从过去以苏州竞立制氢设备有限公司、中国船舶集团第七一八研究所、天津市大陆制氢设备有限公司为代表的老牌电解槽生产企业“三分天下”, 逐步向多领域、多群体“群雄逐鹿”转变。技术路线方面, 从碱性槽单一主导向多种技术共同发展转变, PEM 电解槽市场规模逐渐增大, SOEC、AEM 电解槽产品下线数量逐年递增。2023 年以来, 我国 5 MW 碱性电解槽实现规模化生产和应用能力, 10 MW 产品已陆续下线; PEM 电解槽实现兆瓦级产品下线, 开展实证示范应用; SOEC 电解槽逐步走出实验室, 200 kW 级产品投入运营; AEM 电解槽实现 10 kW 级产品下线, 但仍有待实证验证^[16]。从电解槽下线数量来看, 2023 年共有 47 个电解槽产品实现下线, 相比 2022 年增加一倍, 其中碱性电解槽下线数量达到 30 个(见图 3)^[17]。

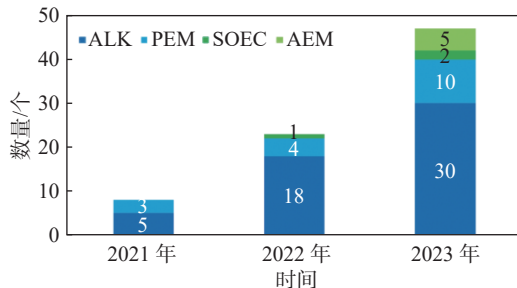


图 3 2021—2023 年我国电解槽不同技术路线产品下线数量^[17]

Fig. 3 China's electrolysis tanks by technology route product shipments, 2021-2023

三是陆上风光制氢一体化示范项目建设提速推动电解槽产能提升, 将带动技术快速迭代升级, 并为海上风电制氢发展做出有益探索。根据中国氢能联

盟研究院统计, 截至 2024 年 7 月, 中国已建成兆瓦级以上可再生能源制氢项目约 47 个, 合计制氢规模约 850 MW, 绿氢产能将近 10 万 t/年(如图 4 所示)。在建与规划项目合计披露绿氢产能近 30 GW。巨大的制氢需求吸引社会各方布局投资电解槽制造, 电解槽产能持续快速提升。截至 2023 年底, 我国共有超过 50 家电解槽企业披露产能, 合计产能规模 34.5 GW, 相比 2022 年规模增幅达 200%, 提高了近 20 GW。这必将为国内电解槽技术迭代发展提供了有利的产业和市场大环境, 带动技术进步和配套产业链成本下降, 为未来海上风电制氢成为行业重要发展方向作好铺垫探索。

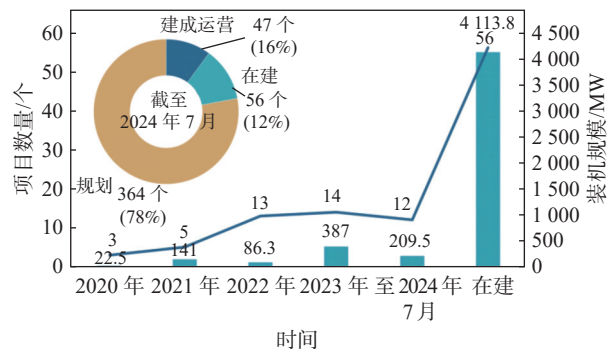


图 4 2020—2024 年我国绿氢项目数量与规模

Fig. 4 Number and scale of green hydrogen projects in China, 2020-2024

总体而言, 当前行业政策、技术、市场环境的发展态势为海上风电制氢产业发展提供了绝佳的土壤。但不可忽视的是, 国内外海上风电制氢均处于起步阶段, 仍在探索可行的技术方案和商业化方案。国内海上风电制氢示范项目如表 2 所示。目前项目进展主要停留在各地产业规划层面或企业内部论证阶段, 实证示范较少, 暂无实际制氢产出。

3 存在的问题

3.1 核心技术有待突破, 关键部件仍依赖进口

在风电装备及零部件方面, 虽然我国风机制造厂商已具备十兆瓦级整机开发与生产制造能力, 基本实现国产化, 但是由于海上风电对可靠性和智能化等性能要求较高, 在主轴轴承、轻量化超长碳纤维叶片、变流器等关键部件和原材料主要依赖进口; 此外在深远海风电建设相对滞后, 浮式风机理论基础研究与国外仍有一定距离^[18]。在海上风电制储运氢系统

表 2 我国典型海上风电制氢示范项目汇总
Tab. 2 Summary of typical offshore wind power hydrogen production demonstration projects in China

地点	项目名称	产能	下游应用	现状
山东省 青岛市	青岛深远海 200万千瓦海上 风电融合示范 风场项目	年发电量约 60亿kWh	“海上风电+波浪发电、海上风电+制氢储氢等”建设, 暂无多样化融合示范应用	2021年开工建设, 暂无后续进展
广东省 阳江市	明阳青洲四海 上风电场项目	年发电量约 18.3亿kWh	“海上风电+海洋牧场+海水制氢”于一体的海上浮式综合能源产业	2023年12月风电场投产, 暂无产氢
海南省 东方市	海上风电制氢 和氢能综合利用示范证项目	年发电量约 49.5亿kWh	“海上风电+海洋牧场+海水制氢”立体化海洋能源创新开发示范项目	2024年7月签约

方面, 首先海上风电受海上复杂环境制约, 海上风机、电解槽及运输管道等核心装备故障率高, 机械装备防腐等关键核心技术仍待升级; 其次, 海上风电波动性与电解槽的波动负荷适应能力、技术可靠性需要进一步论证; 与此同时, 由于海上平台空间有限, 高密度布置下的大规模制储氢安全、用氢终端长距离输送难题等关键技术研究成为制约海上风电制氢的重要因素^[19]。总体上看, 在核心设备制造能力、关键材料技术水平、关键部件制造工艺等方面与国外存在不同程度的差距, 同时由于下游企业对国产化产品信心不足导致缺乏下游企业的支持, 产品的稳定性、可靠性等验证周期长, 反过来减缓了产业链国产化进程。

3.2 项目生命周期成本高成为产业发展关键难点

在建设投资方面, 海上风电制氢项目的投资成本较高, 主要体现在风电设备、电解水制氢设备、氢气储存和运输设施等方面。海上风电项目施工难度高, 受不同海域建设条件差异影响较大, 使得不同项目单位造价差异较大, 特别是漂浮式海上风电项目, 国内项目平均单位造价约 5.47 万元/kW^[20]。图 5 展现了漂浮式海上风电项目的各项成本构成, 其中浮式基础在风电机组成本中占比最高, 接近 70%^[20], 海上风电基础下降是漂浮式海上风电项目降本的重要手段之一。同时由于氢气的市场需求尚未完全启动, 海上风电制氢项目的投资回报周期较长^[21], 这也给

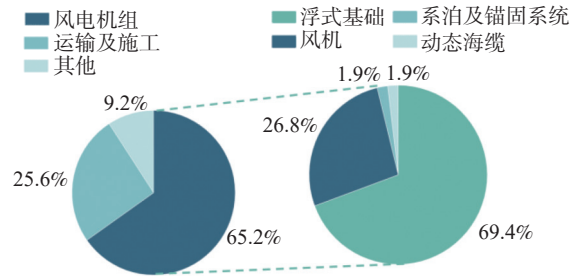


图 5 漂浮式风电项目成本构成^[20]

Fig. 5 The cost composition of floating offshore wind power projects^[20]

投资者带来了较大的风险; 此外, 海上风电制氢项目需要考虑对海洋环境的影响, 以及与渔业和其他海洋活动的兼容性, 这些因素可能会增加项目的复杂性和成本^[22]。

在海上施工和运维方面, 一方面, 专业化海上施工设备短缺已成为我国海上风电制氢产业的薄弱环节。据统计, 目前我国可供利用的海上风电安装船只有 30 艘左右, 年吊装容量为 400~500 万 kW。而欧洲海上风电发达国家现已全部采用自升式平台^[23], 设备适应性强、稳定性高、受海况影响小, 进而增加作业窗口期, 同时集成负荷度高、效率高, 大大缩短风机施工安装时间。另一方面, 我国长期运营海上风电(制氢)项目的运维数据和经验积累仍然相对缺乏, 对风机、海上电解槽运维技术的研究时间相对较短, 海上风电制氢运维市场培育时间也相对不足, 海上风电智能化运维水平较低, 总运维成本可占项目全生命周期总成本 30% 以上, 是陆上风电的 4~5 倍^[24]。因此海上风电制氢项目的全生命周期成本严重制约着产业发展。

在电价和绿氢成本方面, 2022 年起我国取消对海上风电的国补支持, 上网电价从 0.75 元/kWh 降至目前的 0.4 元/kWh 左右, 逐步向市场驱动型过渡。一方面, 欧美发达国家(比如英国)海上风电电价仅为风电场生产电价, 而我国海上风电场开发企业仍需承担至少到上一级变电站的送出工程建设投资费用, 导致国内海上风电支撑电价水平较高。2023 年国际能源署公开数据显示, 欧洲多国(如丹麦、英国)海上风电发电成本持续降低, 其中丹麦海上风电电价已低于 0.31 元/kWh, 低于我国海上风电支撑电价。另一方面, 受限于目前国内海上风电技术不成熟、运维成本高等问题, 海上风电电价与国内实现平价上

网的陆上风电电价(约 0.2 元/kWh)对比仍有很大差距。高昂的海上风电支撑电价直接导致了绿氢成本的高居不下, 当前国内应用最为广泛的 ALK 路线电解水制氢投资成本约为 0.21 元/m³^[25], 海上风电电价为 0.4 元/kWh 时, 按照国际平均水平 5 kWh 电制约 1m³ 氢为标准计算, 绿氢成本约为 2.2 元/m³, 远高于当前国内天然气制氢价格(0.8~1.2 元/m³)及煤制氢价格(0.6~1.2 元/m³), 因此我国海上风电制氢项目经济性方面的欠缺同样为制约发展的关键因素。

3.3 产业形态与政策监管保障要素有待完善

在产业形态方面, 当前我国海上风电产业发展“幕后推手”的政策引导能力远远超过市场主体主观选择能力, 地方“以资源换投资”导致海上风电产业园、风电制氢装备项目等“多地落户“, 加重了企业的负担、加剧产能过剩, 造成资源浪费的同时加大同质化竞争和地方不同程度的产业壁垒, 不利于海上风电制氢产业链健康发展。在政策标准方面, 尽管我国对新能源产业发展给予了高度重视和大力支持, 但在海上风电制氢领域, 相关政策和标准仍不完善。目前, 我国尚未制定专门针对海上风电制氢的政策和规划, 与海上风电制氢领域相关的现有标准主要围绕整机系统的技术条件及安全要求, 而关键零部件标准、海上储氢技术和平台设计、运氢船设计以及质量检测平台和试验方法等领域的相关规范和标准相对空白, 导致产业发展缺乏明确的方向和目标。在项目审批方面, 在海上风电制氢项目开发上, 需要符合海洋主体功能区规划和国防安全部署等要求, 涉海管理部门职责与权限交错重叠、用海审批难度大周期长等或将制约海上风电制氢产业发展。此外, 海上风电制氢项目在监管和扶持政策等方面也存在一定程度的不足, 这对产业的健康发展造成了一定的制约。

4 展望与建议

海上风电制氢产业作为一种创新的“海上风电+”场景与模式, 不仅解决海上风电消纳、并网难题, 也有利于推进清洁能源制氢、拓宽氢源供应渠道, 是风电与氢能产业融合发展的双赢选择。近年来, 国际海事组织升级航运业减碳目标, 绿色低碳已成为船舶航运业发展的必然趋势, 氢燃料动力船舶可实现“零排放”是重要应用路径之一。未来随着深远海

风发电规模化发展, 其技术经济性进一步下降, 与制氢项目结合有望为远洋船舶提供氢气供给服务, 将在改变航运行业商业模式的同时, 也极大释放海上风电的价值。然而, 海上风电制氢是一项庞大、复杂的系统工程, 在积极发展的同时, 也要看到隐患和瓶颈约束等问题, 科学谋划, 合理布局。

一是强化顶层设计, 针对我国海上风电制氢领域政策和规划空缺的问题, 需要研究并制定海上风电制氢产业近中期发展目标 and 路径规划, 因地制宜有序开展海上风电制氢项目。同时加强对海上风电项目的监管和扶持力度, 在项目审批方面, 落实各部门主体责任, 降低海上风电项目在审批方面的额外成本。

二是强化海上风电制氢关键核心技术攻关, 针对风电装备及零部件受制国外的问题, 亟需打破主轴承、轻量化超长碳纤叶片、变流器等关键零部件及制造技术瓶颈; 针对海上风电波动性致使电解槽设备出现的频繁启停技术问题, 需大力发展柔性电解槽制氢技术去解决与适应, 以及增强离网情况下的微电网的支撑能力。此外, 海上风电制氢项目可行性还受储运氢成本高、技术复杂及安全性问题等制约, 仍需进一步探索研究。

三是构建完整的标准体系框架, 针对海上风电关键部件及核心技术领域标准缺失的问题, 亟需构建覆盖海上风电制氢、海上高密度储氢、海上大规模输氢、氢燃料动力船舶、海洋氢能综合安全等领域的标准体系框架以适应氢能制/储/运/用一体化发展需要; 同时全面对标 ISO、IEC、DNV 等发布的标准, 合理采用国际标准和国外先进标准, 积极主导和参与制定国际标准, 全面提升国际化程度、水平和影响。

四是提升对国际相关低碳产品标准的影响力, 目前发达国家、跨国企业都已提出低碳氢、氨、甲醇等碳排放标准和认证规则, 我国近期已发布《碳排放权交易管理暂行条例》, 建议依次为契机进一步提升我国绿氢产业“软实力”, 逐步影响和引导国际相关标准规则的制定, 为后续海上风电制氢的下游场景消纳与国际贸易奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 高畅, 李红涛. 海上风电制氢关键技术及突围路径 [J]. 海洋工程装备与技术, 2023, 10(2): 89-94. DOI: 10.12087/oecet.2095-

- 7297.2023.02.14.
GAO C, LI H T. Key technologies and breakthrough path of hydrogen production by offshore wind power [J]. *Ocean engineering equipment and technology*, 2023, 10(2): 89-94. DOI: 10.12087/oet.2095-7297.2023.02.14.
- [2] 张丝钰, 张宁, 卢静, 等. 绿氢示范项目模式分析与发展展望 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 89-96. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009.
ZHANG S Y, ZHANG N, LU J, et al. Analysis and development outlook on the typical modes of green hydrogen projects [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(3): 89-96. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.009.
- [3] 罗珊, 左萌, 肖建群. 海上风电制氢技术及氢能产业发展现状与建议 [J]. *太阳能*, 2024(5): 5-11. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20230527.01.
LUO S, ZUO M, XIAO J Q. Development status and suggestions for offshore wind power hydrogen production technology and hydrogen energy industry [J]. *Solar energy*, 2024(5): 5-11. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20230527.01.
- [4] 徐进. 2023 年我国能源电力发展综述 [J]. *能源*, 2024(3): 29-35.
XU J. Overview of energy and power development in China in 2023 [J]. *Energy*, 2024(3): 29-35.
- [5] 史铁, 张玉广, 宋时莉, 等. 海上风电制氢的现状和展望 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(5): 135-136, 139. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2022.05.037.
SHI T, ZHANG Y G, SONG S L, et al. Status and prospect of hydrogen production from offshore wind power [J]. *China resources comprehensive utilization*, 2022, 40(5): 135-136, 139. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2022.05.037.
- [6] 李雪临, 袁凌. 海上风电制氢技术发展现状与建议 [J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 198-206. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22032.
LI X L, YUAN L. Development status and suggestions of hydrogen production technology by offshore wind power [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 198-206. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22032.
- [7] 王立坤, 郭宇, 陈秋华, 等. 海上风电制氢技术展望 [J]. *设备管理与维修*, 2023(14): 131-133. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.07D.56.
WANG L Q, GUO Y, CHENG Q H, et al. Prospect of hydrogen production technology from offshore wind power [J]. *Plant maintenance engineering*, 2023(14): 131-133. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.07D.56.
- [8] 何玥晨, 陈严飞, 饶云松, 等. 适用于海洋运输的储氢技术及其应用现状 [J]. *油气与新能源*, 2024, 36(2): 66-73. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2024.02.009.
HE Y S, CHENG Y F, RAO Y S, et al. Development and applications status of hydrogen storage technologies for marine transportation [J]. *Petroleum and new energy*, 2024, 36(2): 66-73. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2024.02.009.
- [9] 廖圣平. 船舶氢燃料储存技术分析 [J]. *广州航海学院学报*, 2021, 29(3): 30-34, 45. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8526.2021.03.007.
LIAO S P. Analysis of hydrogen storage techniques on board ships [J]. *Journal of Guangzhou maritime university*, 2021, 29(3): 30-34, 45. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8526.2021.03.007.
- [10] 何银. 风电场频率主动支撑技术研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023. DOI: 10.27047/d.cnki.ggudu.2023.001221.
HE Y. Research on frequency active support technology of wind farm [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023. DOI: 10.27047/d.cnki.ggudu.2023.001221.
- [11] 夏云峰. 2023 年我国与风电相关的主要政策梳理 [J]. *风能*, 2024(1): 46-53. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2024.01.013.
XIA Y F. A compendium of major wind power-related policies in China in 2023 [J]. *Wind energy*, 2024(1): 46-53. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2024.01.013.
- [12] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述 [J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 1-12. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23093.
YAN X R, ZHANG N N, MA K C, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(1): 1-12. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23093.
- [13] 王璐, 张静珠, 孙阳阳, 等. "双碳"背景下氢能产业链标准化现状及建设思考 [J]. *标准科学*, 2024(3): 93-97. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2024.03.014.
WANG L, ZHANG J Z, SUN Y Y, et al. Thoughts on the current status of hydrogen energy industry chain standardization in the context of "dual carbon" goals [J]. *Standard science*, 2024(3): 93-97. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2024.03.014.
- [14] 赵靛. 2023 年中国陆上风电新机型统计 [J]. *风能*, 2024(2): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2024.02.011.
ZHAO L. Statistics of new onshore wind power models in China in 2023 [J]. *Wind energy*, 2024(2): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2024.02.011.
- [15] 姚若军, 高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展望 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.
YAO R J, GAO X T. Current situation and prospect of hydrogen energy industry chain and hydrogen power generation utilization technology [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.
- [16] 武晓彤, 谭磊, 郑越源, 等. 氢经济展望与电解水制氢技术经济性分析 [J]. *化学工业与工程*, 2024, 41(2): 131-140. DOI: 10.13353/j.issn.1004.9533.20230813.
WU X T, TAN L, ZHENG Y Y, et al. Outlook on hydrogen economy and techno-economic assessment of water electrolysis-based hydrogen production [J]. *Chemical industry and engineering*, 2024, 41(2): 131-140. DOI: 10.13353/j.issn.1004.9533.20230813.
- [17] 符冠云, 王子缘, 林汉辰, 等. 动能转换 多点共促氢能高质量发展——2023 年我国氢能发展形势回顾及 2024 年展望 [J]. *中*

- 国能源, 2024, 46(增刊 1): 69-78.
- FU G Y, WANG Z Y, LIN H C, et al. Driving force transition forwards to high quality development: review of China's hydrogen development in 2023 and perspective towards 2024 [J]. *Energy of China*, 2024, 46(Suppl. 1): 69-78.
- [18] 王诗超, 刘嘉畅, 刘展志, 等. 海上风电产业现状及未来发展分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010).
- WANG S C, LIU J C, LIU Z Z, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010).
- [19] 董飞飞, 陈海焱, 张天龙, 等. 深远海域海上风电发展分析与建议 [J]. *中国工程咨询*, 2024(2): 63-66. DOI: [10.3969/j.issn.1009-5829.2024.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5829.2024.02.010).
- DONG F F, CHEN H Y, ZHANG T L, et al. Analysis and suggestions for offshore wind power development in deep and remote seas [J]. *China engineering consultants*, 2024(2): 63-66. DOI: [10.3969/j.issn.1009-5829.2024.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5829.2024.02.010).
- [20] 刘功鹏, 杨羽霏, 杨翠兰, 等. 中欧漂浮式海上风电成本比较与变化趋势研究 [J]. *水利水电快报*, 2024, 45(7): 70-73, 80 DOI: [10.15974/j.cnki.slsdkb.2024.07.012](https://doi.org/10.15974/j.cnki.slsdkb.2024.07.012).
- LIU G P, YANG Y F, YANG C L, et al. Study on cost comparison and variation trend of floating offshore wind power between China and Europe [J]. *Express water resources & hydropower information*, 2024, 45(7): 70-73, 80. DOI: [10.15974/j.cnki.slsdkb.2024.07.012](https://doi.org/10.15974/j.cnki.slsdkb.2024.07.012).
- [21] 米立军, 李达, 高巍. 深远海漂浮式风电技术发展现状与思考 [J]. *新型电力系统*, 2023, 1(3): 211-220. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.230002](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.230002).
- MI L J, LI D, GAO W. Current Status and thinking on deepsea floating wind power technology [J]. *New type power systems*, 2023, 1(3): 211-220. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.230002](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.230002).
- [22] 张彬. 浅析新形势下风电项目投资风险的识别 [J]. *环球市场*, 2019(2): 14.
- ZHANG B. Analysis on the identification of wind power project investment risk under the new situation [J]. *Global market*, 2019(2): 4.
- [23] 张杰. 浅析海上风电施工与运维装备 [J]. *电力系统装备*, 2021(13): 114-115.
- ZHANG J. Analysis of offshore wind power construction and operation and maintenance equipment [J]. *Electric power system equipment*, 2021(13): 114-115.
- [24] 徐一波. 我国海上风电平价上网的探讨 [J]. *科技创新与生产力*, 2024, 45(2): 46-48. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9146.2024.02.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9146.2024.02.046).
- XU Y B. Discussion on the affordable grid access of offshore wind power generation in China [J]. *Sci-tech innovation and productivity*, 2024, 45(2): 46-48. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9146.2024.02.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9146.2024.02.046).
- [25] 梁晓静, 洪族芳, 薛兴宇, 等. 不同制氢路线的经济性分析及比较 [J]. *能源化工*, 2024, 45(1): 30-37. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7906.2024.01.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7906.2024.01.015).
- LIANG X J, HONG Z F, XUE X Y, et al. Economic analysis and comparison of different hydrogen production routes [J]. *Energy chemical industry*, 2024, 45(1): 30-37. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7906.2024.01.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7906.2024.01.015).

作者简介:



金子儿

金子儿(第一作者, 通信作者)

1993-, 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事氢能产业战略研究(e-mail) 597293604@qq.com。

王子缘

1990-, 男, 副研究员, 博士, 主要从事氢能及储能产业战略研究(e-mail) 44941166@qq.com。

李亚杰

1992-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事海上风电及海洋经济技术研究(e-mail) liyaj@csscwindpower.com.cn。

王莹

1980-, 女, 高级工程师, 博士, 主要从事海上风电技术研究及设计(e-mail) wangying@csscwindpower.com.cn。

张佳鑫

1993-, 女, 副研究员, 硕士, 主要从事能源政策研究(e-mail) 411406525@qq.com。

陈雪奎

1979-, 女, 研究实习员, 学士, 主要从事能源科技研究和管理(e-mail) 99502642@qq.com。

段凌婕

2000-, 女, 硕士, 主要从事氢能产业战略研究(e-mail) 1294051204@qq.com。

项目简介:

项目名称 有序阵列电极的双界面调控及大电流电解水制氢**承担单位** 广东工业大学**项目概述** 项目主要围绕有序阵列电极的形核控制和有序生长; 有序阵列电极的电催化性能测试与筛选; 有序阵列电极电催化过程中物质/电子传输机理探究以及高活性有序阵列电极的电解水制氢装备集成展开技术研究。**主要创新点** (1) 提出等离子体处理方法预构化学键的策略, 解决阵列催化剂在惰性基底上形核困难、键合弱的问题; (2) 采用球差电镜、导电原子力显微镜和高速实时相位显微系统对电催化体系双界面中质/荷传输机理探究; (3) 组装电解水装备, 优化电解槽工况下的多物理场, 实现碱性电解水制氢能耗的突破。

(编辑 叶筠英)