

海洋可再生能源装备技术发展研究

郑洁^{1,2}, 杨淑涵^{1,2}, 柳存根^{1,2*}, 王冲³, 林忠钦^{1,2}

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中国海洋装备工程科技发展战略研究院, 上海 200240;
3. 上海交通大学密西根学院, 上海 200240)

摘要: 海洋可再生能源具有绿色清洁、可再生等优势, 在助力海洋领域“碳减排”方面扮演重要角色。海洋可再生能源装备技术是支撑海洋可再生能源高效开发利用的重要抓手。本文梳理了国内外海洋可再生能源装备技术的发展现状, 分析了国际海洋可再生能源装备技术发展趋势, 总结了我国海洋可再生能源装备技术发展存在的问题, 分析认为我国各类海洋可再生能源装备技术发展水平参差不齐, 多能互补的综合利用探索不足, 在装备技术的可靠性、运行维护等方面与国际先进水平仍有差距, 建议通过建立支撑海洋可再生能源装备技术可持续创新发展的中长期规划, 加快突破海洋可再生能源装备核心技术, 加快探索海洋可再生能源装备技术多能互补综合开发的应用场景, 多措并举吸引更多资本、加快产业化发展等措施, 实现提高海洋可再生能源装备技术可靠性、降低商业发电成本、安全环保等发展目标。

关键词: 海洋可再生能源; 装备技术; 应用场景; 产业需求; 综合开发

中图分类号: P743 **文献标识码:** A

Development of Marine Renewable Energy Equipment and Technologies

Zheng Jie^{1,2}, Yang Shuhan^{1,2}, Liu Cungen^{1,2*}, Wang Chong³, Lin Zhongqin^{1,2}

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. China Strategy Institute of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China; 3. University of Michigan-Shanghai
Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: Marine renewable energy (MRE) has the advantages of being green, clean, and renewable, and plays an important role in reducing carbon emissions in the marine sector. MRE equipment and technologies are crucial for the efficient development and utilization of MRE. This study introduces the development status of MRE equipment and technologies in China and abroad, analyzes the international development trend of MRE equipment and technologies, and examines the problems existing in the development of MRE equipment and technologies in China. Specifically, the development levels of different types of MRE equipment and technologies are uneven, the comprehensive utilization of multiple energy resources is inadequate, and China still lags behind the advanced international level regarding the reliability, operation, and maintenance of the MRE equipment and technologies. To improve equipment reliability, reduce power generation costs, and ensure safety and environmental protection, we suggest that China should formulate a medium- and long-term plan that supports the sustainable and innovative development of MRE equipment and technologies, develop core technologies of MRE equipment, explore application scenarios for the integrated development of multiple energy

收稿日期: 2023-03-20; **修回日期:** 2023-05-05

通讯作者: *柳存根, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授, 主要研究方向为船舶与海洋工程的设计与建造; E-mail: cgliu@sjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国海洋装备产业链发展战略研究”(2022-XBZD-01), “海洋可再生能源装备及产业发展策略研究”(2022-HY-21)

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

resources, and attract more investment to accelerate industrial development.

Keywords: marine renewable energy; equipment technology; application scenarios; industrial demand; comprehensive development

一、前言

开发利用海洋可再生能源 (MRE), 需要装备先行。随着国际社会对海洋可再生能源开发利用重视程度的不断提升, 相关科技投入不断加大, 推动了海洋可再生能源向深远海、综合化的开发利用, 对相应的装备技术提出了适应极端恶劣海况环境、提升能量捕获效率、全生命周期的智能化运维保障等需求。海洋可再生能源装备的技术成熟度、安全可靠性能极大地影响着海洋可再生能源的发电效率和成本, 很大程度决定着海洋可再生能源与其他绿色能源竞争的市场地位。受海域分布、资源储量等因素的影响, 目前不同能源种类的海洋可再生能源装备技术发展程度不一。如何充分发挥不同种类海洋可再生能源的资源优势, 统筹推进相关装备技术在多能互补、综合应用场景下的协同创新效益, 是国际社会关注的重要问题。国内外行业单位、机构和学者都在积极推动海洋可再生能源装备技术领域的发展实践及创新研究。

在海洋可再生能源的概念分类方面, 学界尚未形成统一的权威界定, 主要争议是海上风能、海上光伏以及海洋生物质能是否应被归为海洋可再生能源, 目前主要有两种观点: 狭义的观点将“海洋可再生能源”等同于“海洋能”, 认为其是以海水为基本载体、依附于海水的潮汐能、潮流能、波浪能、温差能和盐差能等^[1,2]。广义的观点则把海上风能、海上光伏等也纳入到“海洋可再生能源”的概念范畴, 认为“海洋可再生能源”是指海洋中所蕴藏的可再生的自然能源, 除了潮汐能、波浪能、潮流能、温差能、盐差能之外, 还包括海洋上空的风能、光伏以及海洋生物质能等^[3-6]。本文认为海洋可再生能源的概念范畴要大于海洋能, 因此将围绕海上风电、波浪能、潮流能、潮汐能、温差能、盐差能、海上光伏七种能源的装备技术问题进行研究。

目前, 学界关于海洋可再生能源装备技术发展的研究, 主要从单一能源种类及其装备技术的视角来分析, 对广义范畴的海洋可再生能源装备技术的全面剖析与发展研究较少。为此, 本文在项目研究、文献调研与专家研讨的基础上, 以七种海洋可

再生能源装备技术为切入点, 探讨国内外海洋可再生能源装备技术的发展实践、技术成熟度、发电成本等问题, 针对我国海洋可再生能源装备技术发展过程中存在的突出问题提出相关发展建议, 以期为我国海洋可再生能源装备技术发展提供借鉴。

二、国际海洋可再生能源装备技术发展现状与趋势

(一) 国际海洋可再生能源装备技术发展现状

结合国际发展实践来看, 发电是海洋可再生能源开发利用的主要方式, 实践中已有不少利用海洋可再生能源装备技术为沿海国家提供电力供给的项目, 在不具备岸电的情况下, 可实现孤网直供电。目前以单一能源种类的海洋可再生能源发电装置为主, 且多数停留在项目示范阶段, 未能达到产业化发展的程度。缺乏资金、高昂的发电成本、供电的间歇性和安全性问题是单一能源种类的海洋可再生能源发电装置难以推向市场的主要阻碍。

1. 海上风电装备技术

海上风电装备技术是目前海洋可再生能源开发利用中最成熟、应用最广泛的领域, 主要包括固定式海上风机和漂浮式海上风机, 其中固定式海上风电已进入大规模商业化开发阶段。目前漂浮式海上风电项目开发受到越来越多的政府和企业关注, 处于以示范项目为主的预商业化阶段^[7]。截至 2021 年年底, 欧洲作为最大的海上风电区域市场, 累计装机容量占全球总量的 50.4%, 北海 (大西洋东北部的边缘海) 和波罗的海周边国家建立了成熟的海上风电供应链体系。英国 2009—2020 年的海上风电累计装机容量一直位居全球第一^[8], 2022 年 8 月在英国海域全面投入运营的 Hornsea 2 号, 是目前世界上最大的在运营海上风电场, 总装机容量超过 2.85 GW, 能够帮助超过 140 万户家庭实现清洁和可再生能源供电^[9]。海上风电技术发展已不存在从无到有的突破问题, 主要是通过技术优化实现单机单位功率产出最大化的目标, 风机的可靠稳定性和便于维护始终是海上风电技术设计的核心准则, 重点需要解决大型轴承、齿轮箱、叶片等配套设备

的瓶颈，风机叶片的可循环降解使用等问题。

2. 波浪能装备技术

据不完全统计，全球已有的波浪能技术研发概念多达 200 多种，主流的技术类型包括：点吸式（point absorbers）、衰减式（attenuator）、振荡水柱式（oscillating water column）、越浪式（overtopping）等，其中点吸式、振荡水柱式的技术成熟度较高，已进入预商业化阶段^[10]。目前多国已建成能够在海洋环境中持续运行的波浪能装置，如美国的点吸收波浪能装置（PowerBuoy）、英国的筏式波浪能装置（Pelamis）等。2022 年 6 月，瑞典 CorPower 公司正式推出首个商业化的波浪能转换器 C4 以及新的“CorPack”概念，目前已安装到葡萄牙阿古萨多拉（Aguçadoura）海岸，成为世界上第一个并网的波浪能发电场。但受各海域波浪能资源、开发侧重不同等因素的影响，各定制化的波浪能装置在特定海域的发电成本高低不同，使行业内对各种波浪能技术的看法并不统一，也很难统一。波浪能技术未来优化的主要方向是帮助提高装置在极端海况下的生存能力，降低全生命周期内的发电成本^[11]。

3. 潮流能装备技术

潮流能发电目前是海洋可再生能源开发利用的重点领域，其装备技术已接近成熟，很多预商业化项目正在进行。主流的潮流能转换装置包括：水平轴式潮流能水轮机、垂直轴式潮流能水轮机、导流罩式潮流能水轮机；常见的潮流能发电系统载体结构包括：固定式载体和漂浮式载体。欧洲拥有全球 41% 的潮流能开发商，主要位于荷兰、法国，其他对潮流能装备技术参与度较高的国家主要有美国、英国和挪威^[12]。英国亚特兰蒂斯公司的 Meygen 项目是目前世界上规模最大的潮流能项目，也是唯一已开始建设的商用多涡轮机阵列。截至 2022 年 10 月，MeyGen 一期项目已交付超过 47 GW·h 的发电量^[13]。2022 年 10 月，瑞典海洋可再生能源开发商 Minesto 在法罗群岛建立全球首个总装机容量为 30 MW 的潮流能阵列，预计年发电量可达 84 GW·h，相当于 2021 年法罗群岛能源消耗总量的 20%，目前已完成环境影响、内场电缆布线和电网连接工程的评估工作^[14]。随着潮流能发电装备的大型化发展，对装置的可靠性和经济性提出更高要求，如转子的直径设计、基础结构设计、设备的布设和回收技术、运行和维护方式、材料的耐腐蚀性、环境影响等方面都

需不断优化提升。

4. 潮汐能装备技术

潮汐能装备运行所使用的水电技术已基本成熟，数十年前已实现商业化运行。潮汐能发电主要有两种技术路径：单水库式（单向运行、双向运行）、双水库式（单向运行、双向运行、抽水增能发电）。截至 2021 年年底，潮汐能发电占海洋能总装机容量的 90% 以上^[7]。典型的是法国 1966 年建设的 240 MW 朗斯潮汐电站和韩国 2011 年建成的 254 MW 始华湖潮汐电站^[15]。此外，英国、加拿大、美国等国也都有相关的政策规划及实践项目。英国被认为拥有世界上最好的潮汐资源，在潮汐能装备技术方面已处于全球领先水平。英国 Mersey 潮汐能发电项目于 2022 年 3 月启动招标，在建设和运营中能够创造数千个就业岗位，建成后可为约 100 万户家庭供电^[16]。在技术提升方面，可通过继续优化多级蓄水技术不断降低潮汐变率的影响，采用双向流动发电技术提升水轮机效率、降低成本，加强对潮汐电站所在海域的生态环境影响监测。

5. 温差能装备技术

温差能装备技术进展较慢，目前温差能发电主要有三种转换方式：开式循环发电、闭式循环发电、混合式循环发电，其中开式循环发电系统较为成熟。截至 2021 年，全球共投产、在建以及规划的温差能项目超过 20 个，额定功率从 15 kW 到 20 MW 不等，总装机容量超过 150 MW^[17]。美国、日本、韩国、法国、中国等国家温差能装备技术进行了大量的研究，并建设了多个示范性温差能发电站，如日本冲绳县久米岛的 50 kW 的示范项目、美国夏威夷的 100 kW 的并网电站。迄今为止，仅有两座 1 MW 的浮式温差能电站投入运行，即韩国 K-OTEC 1000 驳船和夏威夷近海的 OTEC-1 试验设施^[18]。2021 年，英国 Global OTEC 公司计划在非洲开发温差能，为圣多美和普林西比民主共和国这一离网岛屿提供绿色能源^[7]。温差能装备技术研究的关键是强化传热传质技术，重点是如何通过提高热交换系统性能不断增强热转换效率，减少电量损耗的同时提高经济可行性。

6. 盐差能装备技术

当前，盐差能装备技术成熟度最低，仍处于实验室研究阶段，距实现应用和产业发展还有很长的路要走。目前，常见的盐差能发电技术主要包括渗透压法、反电渗析法、蒸汽压差法和“混合熵电

池”，其中渗透压法和反电渗析法是目前研究和示范的主要技术，在挪威、荷兰已经投入试点^[19]。美国、荷兰、挪威、瑞典等国家在盐差能装备技术研究方面较为领先，中国和日本等也就盐差能开发利用技术开展了相关研究^[20]。目前，荷兰 REDstack 公司的 50 kW 的试点项目正在进行盐差能发电，这是世界上首个自 2014 年开始至今还在持续运行的盐差能发电设施^[21]。渗透膜材质的选择、水流净化等技术将是下一步的重点研究方向。

7. 海上光伏装备技术

海上光伏装备主要由四大系统构成：漂浮系统、锚固系统、敷设系统、接地系统，其中漂浮系统是关系到整个电站能否正常运行的重要支撑平台。从结构上看，海上光伏装备分为桩基固定式和漂浮式两大类，当前漂浮式海上光伏装备造价虽较高，但应用范围广，未来或成为主流形式。由于各国的技术水平存在差异，目前全球海上光伏装备技术还处于研究和工程示范阶段，主要面临抗海风、抗波浪、抗腐蚀和锚固等多方面技术难题。2021 年 3 月，挪威船级社（DNV）发布了全球首个针对海上光伏项目的推荐做法——“DNV-RP-0584-浮式光伏系统设计、开发和运行推荐实施规程”指南，为海上光伏项目的开发、运营和退役提供了指导^[22]。已有不少国家开展了相关装备技术的研发应用，预计部分商业项目在未来几年投入运营，如德国莱茵集团（RWE）和荷兰 SolarDuck 公司的海上光伏试点项目、挪威 Equinor 公司的海上光伏项目。目前来看，海上光伏的总体技术设计难度比波浪能小，其装备技术研发的难点和重点是抗风浪的浮体设计，既要确保浮体设计在极端海况下的生存能力，又需考虑选择经济性较好的浮体结构方案；另外还需要加强海上光伏板的耐腐蚀性能及远程监测运维等方面的研究。

（二）国际海洋可再生能源装备技术发展趋势

国际可再生能源署（IRENA）、国际能源署—海洋能源系统（IEA-OES）等全球海洋可再生能源领域的权威机构，一致认为为满足海洋可再生能源向深远海、综合化发展的战略需求，有研究能力的国家应加快相关装备技术的研发投入，为海洋可再生能源产业化发展提供装备技术的硬支撑。总体来看，不同能源种类的海洋可再生能源装备技术发展

水平存在较大差异：一方面，海上风电装备技术（固定式）已基本实现商业化发展，波浪能、潮流能和潮汐能装备技术发展势头强劲，温差能、盐差能、海上光伏装备技术还处于技术研发、验证和工程示范阶段；另一方面，英国、美国、挪威、荷兰等欧美国家在海洋可再生能源装备技术创新方面引领发展。目前海洋可再生能源装备技术发展主要面临成本效益低、稳定可靠性差及与其他能源耦合应用的适用性不足等问题。

1. 海洋可再生能源装备技术向多能互补、综合应用发展

从国际发展趋势来看，海洋可再生能源装备技术正在向模块化、高性能、低耗散、低成本等方向发展。随着装备技术的成熟，针对单一海洋可再生能源发电存在的功率低、电费高、电能输出不稳定等问题，采用多种海洋可再生能源互为补充发电成为一种重要的发展趋势^[23]。通过共享海上装备技术平台构建多能互补的应用场景，能够在分摊前期高昂成本投入的同时提供持续稳定的电力供给。

实践中已有诸多两种或两种以上海洋可再生能源装备技术的耦合设计和示范项目，最具代表性的是以海上风能为主导的应用，包括海上风能+潮流能、海上风能+波浪能、海上风能+海上光伏+波浪能等。例如，瑞典的 Minesto 公司建造的海上风能+潮流能互补发电系统可在极端海况下为海上浮标的运行和通信供电^[24]。此外，还有潮流能+波浪能、海上光伏+潮流能等多能互补综合利用的项目实践。除直接供电外，通过对海洋可再生能源的电解可进一步生产氢气、氯气、纯碱、烧碱及氧气等副产品^[25]，创造更多附加的经济效益，提高海洋可再生能源装备技术的利用价值。在这种多能互补的综合应用场景下，对相关装备技术的综合化、集成化提出了更高的发展要求。

2. 海洋可再生能源装备的技术成熟度逐渐提升

目前国内外学者多采用技术成熟度（TRL）这个指标来对比不同种类海洋可再生能源装备工程样机的技术成熟度，且行业界关于海洋可再生能源装备的 TRL 和发展阶段的评价不一：根据海洋能源系统（OES）的 TRL 界定标准：潮汐能装备技术处于预商业化—商业化阶段（TRL6~9），温差能装备技术处于工程示范—商业化阶段（TRL5~9），潮流能装备技术处于原型—商业化阶段（TRL3~9），波

浪能装备技术处于研究-预商业化阶段 (TRL1~8), 盐差能装备技术处于研究-原型阶段 (TRL1~6)^[26]。根据欧洲海洋委员会 (EMB) 的 TRL 界定标准: 海上风电装备技术 (固定式) 已实现商业化 (TRL9), 其中浮式风电装备技术处于预商业化阶段 (TRL8), 潮汐能装备技术处于商业化阶段 (TRL9), 波浪能装备技术处于工程示范阶段 (TRL7), 潮流能装备技术处于工程示范阶段 (TRL6), 海上光伏装备技术处于工程示范的早期阶段 (TRL5)^[27]。

综合多方观点, 本文将海洋可再生能源装备的技术成熟度分为商业化 (大规模并网发电, TRL9)、预商业化 (并网发电, TRL7~8)、工程示范 (样机, TRL4~6)、研究 (原理和实验室, TRL1~3) 四个阶段。固定式海上风电和潮汐能装备技术进入商业化阶段 (TRL9); 漂浮式海上风电和潮流能装备技术进入预商业化阶段 (TRL7~8); 波浪能装备技术 (TRL1~7) 因概念设计众多, 发展程度不均衡, 既有达到预商业化的波浪能装置, 也有处于原理研究阶段的波浪能新概念在提出; 温差能装备技术处于工程示范向预商业化发展阶段 (TRL5~8); 海上光伏装备技术得益于陆地光伏技术的成熟发展, 由研究开始进入工程示范阶段 (TRL4~6); 盐差能装备技术进展缓慢 (TRL1~3) (见表1)。总体而言, 随着各国的重视和科技研发投入的增加, 各类海洋可再生能源装备向好发展, 技术成熟度逐渐提升。

3. 海洋可再生能源装备技术的发电成本随商业化程度的提升而降低

商业市场尚未形成对海洋可再生能源装备技术发展的推动力, 由于实际建造、安装和运行的样机很少, 缺乏对装备利用率和运维成本的长期运行数据累积, 因此无法准确验证商业发电成本, 目前多采

用平准化电力成本 (LCOE), 即通过海洋可再生能源工程样机发电成本来对比各种发电方式的经济性, 该成本估算很可能高于未来技术更成熟的商业化机型的发电成本。受样机性能参数、运行环境不同等影响, 目前也存在各机构对同一类型海洋可再生能源估算的 LCOE 不同的情况, 但对不同类型海洋可再生能源装备 LCOE 的价格对比排序是基本一致的。

根据 EMB 统计显示, 目前海上风电装备技术的 LCOE 最低, 约为 0.08 \$/(kW·h); 其次是海上光伏装备技术, 约为 0.06~0.11 \$/(kW·h), 波浪能和盐差能装备技术的 LCOE 相对其他几种海洋可再生能源而言较高 (见表2)^[10,28]。根据 IRENA 统计显示, 海上风电的全球平均 LCOE 从 2010 年的 0.162 \$/(kW·h) 下降到 2020 年的 0.084 \$/(kW·h), 海上光伏的平均 LCOE 约为 0.354 \$/(kW·h), 潮流能的 LCOE 约为 0.20~0.45 \$/(kW·h), 波浪能的 LCOE 约为 0.30~0.55 \$/(kW·h)。

现有相关数据显示, 随着技术成熟度和商业化程度的提高, LCOE 呈下降趋势。以海上风电为例, 2010 年的 LCOE 约为 0.159 \$/(kW·h), 在 2020 年降低到 0.108 \$/(kW·h)^[10]; 预计到 2030 年潮流能的 LCOE 可降至 0.11 \$/(kW·h), 波浪能的 LCOE 可降至 0.165 \$/(kW·h)^[29]; 一些国家的海上光伏 LCOE 已实现与陆地光伏平价竞争, 例如, 马来西亚的一个 13 MW 浮动光伏阵列的 LCOE 约 0.051 \$/(kW·h), 预计海上光伏发电技术在 2030 年达到 0.05 \$/(kW·h) 的竞争价格, 在 2050 年降至 0.04 \$/(kW·h)^[30]。

三、我国海洋可再生能源装备技术发展现状与问题

(一) 我国海洋可再生能源装备技术发展现状

国内非常重视推动海洋可再生能源装备技术的

表1 国际海洋可再生能源装备的技术成熟度对比

装备技术类型	技术成熟度 (TRL)	发展阶段
海上风电装备技术 (固定式)	9	商业化阶段
潮汐能装备技术	9	商业化阶段
潮流能装备技术	7~8	预商业化阶段
波浪能装备技术	1~7	研究-预商业化阶段
温差能装备技术	5~8	工程示范-预商业化阶段
盐差能装备技术	1~3	研究阶段
海上光伏装备技术	4~6	工程示范阶段

创新发展,在《海洋可再生能源发展“十三五”规划》中将潮汐能、潮流能、波浪能技术列为海洋可再生能源技术发展重点;在《“十四五”可再生能源发展规划》中,提出要稳妥推进潮汐能、潮流能、波浪能等海洋可再生能源的示范化开发。各沿海省份响应国家号召,积极推动海洋可再生能源装备技术的发展。

总体来看,除温差能和盐差能装备技术的发展落后于国际先进水平外,我国海上风电、潮流能的装备技术在装机规模、发电总量等方面与国际先进水平差距不大,甚至部分装备技术已走在世界前列,我国海洋可再生能源装备技术成熟度对比见表3。

1. 海上风电装备技术

尽管我国海上风电装备技术起步较晚,但在政策红利的支持下不断创新升级,推动近海海上风电进入商业化发展阶段^[31]。目前,我国是除欧洲以外最成熟的海上风电市场^[8],截至2022年年底,我国海上风电累计装机容量达25.6 GW,占全球海上风电总容量的44%^[32]。2021年12月,国内离岸最远(超80 km)的海上风电项目——三峡能源江苏大丰

H8-2海上风电项目实现全容量并网发电,项目投产后,预计可满足约37万个家庭一年的正常用电需求^[33]。此外,尽管仍面临高成本的挑战,但我国在浮式海上风电装备工程样机领域已有了相关的探索和实践,如“三峡引领号”“海油观澜号”。国内海上风电装备技术面临机舱等关键系统交付周期较长、缺少能够处理最大涡轮机的重型施工船等问题,亟需实现超长碳纤维叶片、大功率齿轮箱、主轴轴承等核心零部件的自主研发^[34]。

2. 波浪能装备技术

近年来,我国波浪能装备已成功应用于海岛供电、水产养殖、仪器供电等方面,应用领域不断拓展,多次创造世界纪录^[35]。由中国科学院广州能源研究所自主研发的半潜式波浪能养殖平台“澎湖号”首台工程样机上配备了60 kW波浪能和60 kW海上光伏发电技术,可提供超过日常所需的绿色电力供给,该平台实现了将半潜式波浪能发电、养殖工船建造、深水养殖等技术的创新集成^[36],已连续无故障运行三年多。2023年1月,由中国南方电网广东电网有限公司牵头研制的世界首台兆瓦级浮式波浪能发电装置下水调试,标志着兆瓦级波浪能发电技术从理论研究迈向工程实践的新阶段^[37]。目前,波浪能装备技术的发展亟需选定几种比较规范化的装置去重点提升成熟度、经济性、服务寿命,推动其示范落地,而非盲目追求大型单机的发展^[38]。

3. 潮流能装备技术

我国潮流能装备技术发展已从实验室研究走向预商业化阶段,在运行时间和并网发电量方面均居世界前列。浙江省潮流能装备技术研发和试验一直走在国内前列。自2019年8月,舟山潮流能发电项目作为世界首座潮流能发电站投入运营以来,实现了潮流能开发利用的大功率发电、稳定发电、并入国家电网等一系列重大突破。2022年4月,世界最大单机LHD 1.6 MW潮流能发电机组“奋进号”并入国家电网,连续运行时间和发电量均居世界前列,潮流能发电成本将大幅下降^[39]。实践中,我国潮流能装备技术在实践中主要存在单机容量小、海试运行时间短、装置易损坏、发电效率不高等问题,潮流能装置在实际海况下运行的可靠性、稳定性等相关技术亟待突破^[40]。

4. 潮汐能装备技术

我国潮汐能装备掌握了拦坝式潮汐能发电、发

表2 国际海洋可再生能源装备技术的平准化电力成本对比

装备技术类型	估算的平准化电力成本/ (\$/kW·h)
海上风电装备技术(固定式)	0.08
海上光伏装备技术	0.06~0.11
温差能装备技术	0.03~0.38
潮流能装备技术	0.2~0.9
波浪能装备技术	1.46
盐差能装备技术	0.11~2.37
潮汐能装备技术	—

表3 我国海洋可再生能源装备技术成熟度对比

装备技术类型	技术成熟度 (TRL)	发展阶段
海上风电装备技术 (固定式)	9	商业化阶段
潮汐能装备技术	9	商业化阶段 (特定区域适用)
潮流能装备技术	7~8	预商业化阶段
波浪能装备技术	1~6	研究-工程示范阶段
海上光伏装备技术	3~6	研究-工程示范阶段
温差能装备技术	4~5	工程示范阶段
盐差能装备技术	1~3	研究阶段

电机制造及电站运行等关键技术，已具备商业化开发潮汐能的技术条件^[43]，在潮汐电站建设方面具有丰富的实践经验，目前运行的潮汐电站包括：浙江温岭江厦潮汐电站、浙江海山潮汐电站和山东白沙口潮汐电站。其中，江厦潮汐电站装机容量位居全球第四^[41]，已商业化稳定运行40余年；海山潮汐电站是我国至今为止唯一的双库、单向、全潮蓄淡、蓄能发电和库区水产养殖综合开发的小型潮汐电站^[42]。制约潮汐能装备技术发展的主要因素包括：一是可供建设潮汐电站的选址比较少，适合区域性因地制宜开发，难以大范围推广；二是发电成本较高；三是泥沙管理带来的环境影响问题，因此，在国内并未实现大规模商业化推广。

5. 温差能装备技术

我国温差能装备技术研究起步较晚，基础研究比较落后，目前仍处于工程示范阶段，相关装备技术尚不成熟，在示范规模和净输出功率方面明显滞后于国际先进水平^[41]。在国家相关科技计划和海洋能专项资金的支持下，国家海洋技术中心、天津大学、中国海洋石油集团有限公司等相关单位开展了一系列研究和试验工作，当前的研究重点聚焦在循环理论方面^[43]。2022年11月，中国船舶集团第七〇四研究所承担国家部委科研项目中设计的“兆瓦级海洋温差发电用向心式透平发电机组设计方案”“兆瓦级海洋温差发电用质泵设计方案”获得中国船级社颁发的原则性批准（AIP）认可证书^[44]。然而，温差能发电装备技术的建设及运营成本高昂，占整个发电装置的50%，而投资回报周期长，严重制约了温差能装备技术的发展^[43]。

6. 盐差能装备技术

我国自20世纪80年代起开始开展盐差能装备技术研究，目前仍处于研究阶段。2015年盐差能装备技术项目首次被纳入国家海洋可再生能源专项资金，中国海洋大学获得资助并开展了100 W缓压渗透式盐差能发电关键技术研究，并在渗透膜性能提高、膜组结构设计、渗透压力交换器等关键技术上取得突破^[20]。2022年，中国科学技术大学在用于盐差能发电的离子交换膜方面取得新进展，实现了高效率多形式盐差能发电^[45]。高成本的膜材料是限制盐差能装备技术发展的主要因素，应尽快突破高效正渗透和电渗析膜组件技术，以降低膜的运行成本，提高使用寿命^[41]。

7. 海上光伏装备技术

我国海上光伏装备技术发展仍处于研究、工程示范阶段。山东、浙江、福建等省份积极出台相关政策推动海上光伏布局。截至2022年5月底，我国实际确权的海上光伏用海项目共计28个^[46]。相比单一发电，“海上光伏+”综合利用取得了一定的成就。2022年10月，国家电投山东半岛3号海上风电场20 MW深远海浮式光伏500 kW实证项目在山东烟台成功发电，这是全球首个投用的深远海风光同场浮式光伏项目^[47]。海上光伏装备技术发展中存在成本高、海域面积占用大、发电效率低、浮体机械装置的设计难、光伏板易受腐蚀、抗风浪的性能差等问题^[48]，亟需解决海洋环境乃至极端海况下相关设备装置的适用性和安全保障问题。

（二）我国海洋可再生能源装备技术发展中存在的问题

总体来看，国内以上七种海洋可再生能源装备技术发展水平参差不齐，海上风电、潮汐能的装备技术相对成熟，已实现并网发电；波浪能、潮流能、海上光伏发展势头迅猛，正在向深远海、兆瓦级发电装置发展；温差能、盐差能装备技术发展相对滞后于国际先进水平，处于研发和工程示范阶段。在未来推进海洋可再生能源产业化发展中，所需的装备技术发展面临极端海况下的装置安全适用性、资源储量的充分调查与评估、多种资源开发的互补性应用、装置设施对所在海域的环境影响评价、商业化发展后的海上安装活动的安全监管、电网的接入和调控等共性问题。结合实践发展需求，目前国内加快推进海洋可再生能源装备技术发展面临以下几方面的主要问题亟待解决。

1. 缺乏支撑海洋可再生能源装备技术持续创新的统筹规划

我国在海洋可再生能源开发利用方面缺乏长期统筹规划。受资源分布、技术发展水平以及市场需求等因素的影响，目前海洋可再生能源开发利用水平存在地域差异，不同海洋能源种类的产业化程度也存在较大的差别。而简单的“一刀切”政策难以适应不同海域、不同类型海洋可再生能源的发展需要，不利于实现对同一海洋空间多种海洋资源的协同高效开发利用。目前针对海洋可再生能源装备技术创新研发的基金、工程示范项目的政策支持存在

阶段性断续现象，更多的是在鼓励相关装备技术从0到1的突破，缺乏对装备技术后续从1到10的产业示范推广的有效支撑，不利于相关科研单位对该领域核心关键基础技术的长期研发投入及产业转化。此外，现阶段对不同类型海洋可再生能源的政策支持力度不均衡，海上风电相关的政策规划较多，而对波浪能等目前发展能力相对薄弱的其他海洋可再生能源的政策支持无法满足现实需求。

2. 亟待提升海洋可再生能源装备技术的可靠性和稳定性

海洋可再生能源装备技术的研究重点和难点是提升装置的成熟度、经济性，延长装置的服务寿命。海洋环境十分复杂，实际海况下的巨浪台风生物污染、海水腐蚀等极端条件会严重缩短海洋可再生能源装置的使用寿命，海洋可再生能源装备及系统面临抗风浪、防腐蚀、水密性以及软件控制等问题^[49]，可能造成能量捕获和利用效率低、维修保养需求增加等不良影响。加上随着产业化规模的推进，海洋可再生能源开发利用向深远海发展，相关装备技术的高效、持久、安全、稳定等方面的性能支撑仍显不足，海上试验及工程实践中不乏因装备技术可靠性差导致无法持续运行发电、电力无法平稳输出并网的情况；在多能互补综合开发的应用场景下，海洋可再生能源装备技术的综合集成化发展水平亟待提升。

3. 有待拓展多能互补综合开发的海洋可再生能源装备技术应用场景

随着海洋开发活动的持续推进，难免发生海域使用重叠的现象，因此海洋空间的合理规划、高效协同利用显得尤为必要。依托海洋装备技术支撑，实现多能种海洋可再生能源协同发电并直接输电用于海洋养殖平台、油气开发平台等活动场景下的绿色动力供给，是解决海洋资源高效开发、海洋空间协同利用的有效措施。但究竟在特定海域条件下适合开展哪些能源种类和海洋生产活动的有效协同，需根据能源特性、动力供给需求等因素开展预研，因地制宜提出切实可行的海洋可再生能源多能互补综合开发应用场景。目前虽有相关实践，但由于海洋可再生能源的间歇性，多能互补系统在电力输出方面还存在较大波动，且面临成本高、基础设施不足等问题^[50]。

4. 尚需有效降低海洋可再生能源装备技术的发电成本

高昂的成本是限制海洋可再生能源装备技术广泛应用的重要因素，海洋可再生能源装备发展普遍存在研发和交付周期长、转化率低、运维和试验费用高等问题。比如我国海上风电行业尚不具备平价上网的条件^[31]；波浪能发电成本比传统热发电成本高10倍左右^[48]；深层低温海水取水装置及建设成本占整个发电装置的一半，而投资回报周期长^[43]；海上光伏电站建设成本比陆上光伏电站高出5%~12%，而项目投资收益率为7.6%，投资回收期需要11.63年^[48]。在这种情况下，仅依靠政府的资金支持是不足以支撑海洋可再生能源装备技术的高效研发创新乃至产业化推广的，需要在市场机制下，吸引更多民间资本的注入，以市场内生力带动和加速该领域的技术迭代，进而提高发电效率，降低装置建造、运营和维护成本，推动海洋可再生能源的平价电力入网。

四、促进我国海洋可再生能源装备技术高质量发展的建议

（一）立足资源禀赋，建立支撑海洋可再生能源装备技术可持续发展的中长期规划

可持续的发展规划、完备的政策体系是推动海洋可再生能源装备技术高质量发展的前提条件。建议立足国内海域资源禀赋，秉承海域空间统筹高效开发的原则，面向2035/2050年，制定推动海洋可再生能源开发利用的中长期规划，明确主要目标、发展路线图和各阶段的重点任务，确保在充分的资源调查和评估基础上，因地制宜提出满足海洋可再生能源产业化发展需求的装备技术支撑方案。相关法规政策的配套与调整是解决海洋可再生能源开发中面临的技术、市场等方面问题的关键举措。虽然国务院和地方政府颁布了规范海洋可再生能源开发利用的相关“办法”，从短期来看，可以快捷推动单一类型海洋可再生能源及其装备技术的发展，但从长远来看，无法持久稳定地保护与规范相关参与主体的权利和义务。建议秉承全局发展观念，从《可再生能源法》层面，自上而下建立具有持久法律效力的、成体系的法规政策支撑，为海洋可再生能源装备技术的发展提供法律保障。

(二) 加快突破海洋可再生能源关键核心技术, 提高装置可靠性

抓紧突破海洋可再生能源开发利用的关键核心技术, 缩小我国在装机功率规模、装备可靠性、技术成熟度等方面同国际一流水平的差距是尽早实现海洋可再生能源由“能发电”向“稳供电”阶段转型的重要抓手。一要聚焦基础性、前瞻性、颠覆性技术的持续创新攻关, 切实提高国产设备性能和工艺的同时, 加大创新技术的国际引领作用, 加快系泊系统、防腐新材料、电网技术、软件控制、智能运维等海洋可再生能源关键技术的攻关; 二要多管齐下全面推进不同类型海洋可再生能源装备技术的工程示范、规模化应用, 健全大型海洋可再生能源试验场的配套建设, 重视极端海况下海洋可再生能源装置的样机测试、认证, 促进海洋可再生能源装备技术的开发、验证、改进、提升等环节的循环迭代发展; 三要充分发挥企业作为海洋可再生能源装备技术创新的主体作用, 以“产学研用”相结合的模式协同行业内的高校、科研院所、企业共同推动相关装备技术向集成化、规模化、产业化发展, 以合作促进优势资源共享, 降低重复低质的研发投入。

(三) 加快探索海洋可再生能源装备技术多能互补综合开发的应用场景, 推动项目落地

在海域空间协同利用、海洋资源协同开发的需求导向下, 海洋可再生能源不应被视为一种独立的资源开发, 而应被视为一种可为其他海洋产业发展增创效益的协同开发方案, 比如海洋可再生能源发电与海洋养殖、海岛开发、海洋油气资源开发平台供电等应用场景的综合发展。因此, 亟待通过专项预研的方式, 结合国内海域资源特点、海洋产业基础、经济发展需求等因素, 深入挖掘和论证现有海洋产业活动与海洋可再生能源的耦合应用场景的可行性, 创新探索研发能够满足多能互补综合应用场景的海洋可再生能源装备技术, 依托现有的海洋装备产业发展优势和基础, 加快设计建造多能互补的综合海洋能源开发装备平台, 在该平台上实现从海洋可再生能源转化发电到为海水淡化装置、海洋油气平台、海洋养殖网箱等设施供电的集成化和综合化应用。可充分发挥我国海岛众多的资源优势, 开展海岛周边的资源综合评估, 研制适应海岛开发需

求的多能互补综合利用平台, 在海岛上构建分布式多能互补发电系统和示范工程, 探索海岛海洋可再生能源开发利用新业态。

(四) 多措并举, 降低海洋可再生能源装备技术的发电成本

国内目前已出台了一系列激励政策和措施, 鼓励相关行业部门参与海洋可再生能源开发利用, 但其支持力度难以满足海洋可再生能源产业发展的现实需求。海洋可再生能源开发属于高风险、高投入的新兴产业, 其产业链的形成不仅需要国家层面在科技创新、示范应用等方面持续投入稳定的专项财政资金, 还须对相关装备及重大配套设备的研发、试验、制造、应用、运维等方面进行全链条扶持。如此巨大的资金投入仅靠政府资金无法长期保障, 建议培育以企业为主体、政府为指导的海洋可再生能源产业发展环境, 构建政府和民间投资有机结合的多层次、全周期资金支持体系, 采用税费优惠、贷款贴息、风险补偿、电价补贴等多元方式帮助更多海洋可再生能源装备技术研发项目筹措资金。此外, 还应加大引导保险行业对该领域的商业保险支持, 尽可能降低民间资本投入的风险。在充足资本支持的情况下, 促进多能互补应用场景下的海洋可再生能源装备技术融合, 推进相关装备设施的模块化、集约化生产建造, 降低发电成本、推进平价电力入网。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 20, 2023; **Revised date:** May 5, 2023

Corresponding author: Liu Cungen is a professor from the School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University. His major research field is design and construction of ships and ocean engineering. E-mail: cgliu@sjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Development Strategy of China’s Marine Equipment Industry Chain” (2022-XBZD-01), “the Development Strategy of Marine Renewable Energy Equipment and Industry” (2022-HY-21)

参考文献

- [1] 刘伟民, 刘蕾, 陈风云, 等. 中国海洋可再生能源技术进展 [J]. 科技导报, 2020, 38(14): 27.
Liu W M, Liu L, Chen F Y, et al. Technical progress of marine renewable energy in China [J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14): 27.

- [2] 夏登文, 康健. 海洋能开发利用词典 [M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
Xia D W, Kang J. Dictionary of ocean energy [M]. Beijing: Ocean Press, 2014.
- [3] International Renewable Energy Agency. Fostering a blue economy: Offshore renewable energy [R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [4] 于华明. 海洋可再生能源发展现状与展望 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2012.
Yu H M. The development and prospect of the marine renewable energy [M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2012.
- [5] 高艳波, 柴玉萍, 李慧清, 等. 海洋可再生能源技术发展现状与对策建议 [J]. 可再生能源, 2011, 29(2): 152-156.
Gao Y B, Chai Y P, Li H Q, et al. Status of domestic and international ocean renewable energy technological and development and relevant suggestions [J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(2): 152-156.
- [6] 姜勇, 赵喜喜, 田敬云, 等. 我国海洋可再生能源产业技术发展现状以及山东省未来发展思路 [J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(9): 32.
Jiang Y, Zhao X X, Tian J Y, et al. The current status of technological development of China's marine renewable energy industry and the future development ideas of Shandong Province [J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(9): 32.
- [7] REN21. Renewables 2022 global status report [R]. New York: REN21, 2022.
- [8] GWEC. Global offshore wind report 2022 [R]. Sao Paulo: GWEC, 2022.
- [9] Orsted. Hornsea three offshore community newsletter [EB/OL]. (2022-11)[2022-12-18]. <https://orstedcdn.azureedge.net/-/media/www/docs/corp/uk/hornsea-project-three/hornsea-three-community-newsletter---november-2022.ashx?rev=15b767deff3c4ab1a1f3069a40407373&hash=E79521F1B06D984380830469A94DD5AD>.
- [10] European Union's Horizon. Advanced design tools for ocean energy systems innovation, development and deployment [R]. Derio: European Union's Horizon, 2020.
- [11] Guo B, Ringwood J V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective [J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15: 3065-3090.
- [12] European Commission. The EU blue economy report 2022 [R]. Brussels: European Commission, 2022.
- [13] Simec Atlantis Energy. Tidal stream projects meygen [EB/OL]. (2022-12-27)[2023-02-21]. <https://saerenewables.com/tidal-stream/meygen/>.
- [14] Minesto. Minesto's tidal array buildout progressing on schedule [EB/OL]. (2022-10-05)[2022-12-27]. <https://minesto.com/news-media/minesto%E2%80%99s-tidal-array-buildout-progressing-schedule>.
- [15] 彭爱武. 海洋能发电与综合利用前景与展望 [R]. 北京: 中国科学院老科学技术工作者协会, 2021.
Peng A W. Prospect and prospect of marine energy power generation and comprehensive utilization [R]. Beijing: Association of Senior Scientists and Technologists of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [16] The Liverpool City Region Combined Authority. New step forward on mersey tidal power project [EB/OL]. (2022-03-28)[2023-03-25]. <https://www.liverpoolcityregion-ca.gov.uk/new-step-forward-on-mersey-tidal-power-project/>.
- [17] 陈永平. 海洋温差能利用技术进展 [R]. 深圳: 中国海洋经济博览会, 2022.
Chen Y P. Research on the progress of ocean thermal energy conversion [R]. Shenzhen: China Marine Economic Expo, 2022.
- [18] IEA-Ocean Energy System. White paper on Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) [R]. Paris: IEA-Ocean Energy System, 2021.
- [19] International Renewable Energy Agency. Salinity gradient energy technology brief [R]. Paris: International Energy Agency, 2014.
- [20] 张仿, 孟兴智, 潘文琦. 盐差能利用趋势 [J]. 盐科学与化工, 2021, 50(4): 1-3.
Zhng L, Meng X Z, Pan W Q. Utilization trend of Salinity Gradient Energy(SGE) [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2021, 50(4): 1-3.
- [21] IEA-Ocean Energy System. Annual Report: An Overview of Ocean Energy Activities in 2021 [R]. Paris: IEA-Ocean Energy System, 2022.
- [22] Slater N J. DNV verifies Sungrow FPV's Anchoring and Mooring design methodology using new Floating Solar Recommended Practice [EB/OL]. (2021-10-08)[2023-03-02]. <https://www.dnv.com/news/dnv-verifies-sungrow-fpv-s-anchoring-and-mooring-design-methodology-using-new-floating-solar-recommended-practice-208492>.
- [23] 谢嘉, 桑成松, 马勇, 等. 新能源供电多能互补发电系统设计 [J]. 南京理工大学学报, 2020, 44(4): 501.
Xie J, Sang C S, Ma Y, et al. Design of multi-energy complementary power generation system for new energy supply [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(4): 501.
- [24] 王世明, 李泽宇, 于涛, 等. 多能互补海洋能集成发电技术研究综述 [J]. 海洋通报, 2019, 38(3): 241-249.
Wang S M, Li Z Y, Yu T, et al. A review of multi-energy complementary ocean energy integrated power generation technology [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(3): 241-249.
- [25] 李伟, 杨易嘉, 顾亚京, 等. 基于海洋能的海水资源综合利用研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 33-38.
Li W, Yang Y J, Gu Y J, et al. Comprehensive utilization of seawater resources based on ocean energy [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 33-38.
- [26] IEA Ocean Energy System. Ocean energy in Islands and remote coastal areas: Opportunities and challenges [R]. Paris: IEA, 2020.
- [27] European Marine Board. European offshore renewable energy: Towards a sustainable future [R]. Ostend: European Marine Board, 2023.
- [28] European Commission. Ocean energy technology development report 2018 [R]. Brussels: European Commission, 2019.
- [29] International Renewable Energy Agency. Offshore renewables: An action agenda for deployment [R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [30] Bellini E. Floating solar plant with LCOE of \$0.051/kWh comes online in Malaysia [EB/OL]. (2020-10-21)[2023-05-03]. <https://www.pv-magazine.com/2020/10/21/floating-solar-plantwith-lcoe>

- of-0-038-kwh-comes-online-in-malaysia.
- [31] 秦海岩. 我国海上风电发展回顾与展望 [J]. 海洋经济, 2022, 12(2): 50–58.
Qin H Y. Review and prospect of offshore wind power development in China [J]. Marine Economy, 2022, 12(2): 50–58.
- [32] Global Wind Energy Council. Global offshore wind report 2022 [R]. Sao Paulo: Global Wind Energy Council, 2022.
- [33] 三峡能源. 三峡集团江苏区域多个海上风电项目全容量并网, 创多项“之最” [EB/OL]. (2021-12-25)[2023-03-12]. <https://www.ctgne.com/sxxnychina/1077761/1077661/1266459/index.html>.
Three Gorges Renewables. Three Gorges Renewables Group's Jiangsu offshore wind power projects in Jiangsu region are connected to the grid at full capacity, creating a number of “best” [EB/OL]. (2021-12-25) [2023-03-12]. <https://www.ctgne.com/sxxnychina/1077761/1077661/1266459/index.html>.
- [34] 王富强, 郝军刚, 李帅, 等. 漂浮式海上风电关键技术与发展趋势 [J]. 水力发电, 2022, 48(10): 9–12, 117.
Wang F Q, Hao J G, Li S, et al. Key technologies and development trends of floating offshore wind turbine [J]. Water Power, 2022, 48(10): 9–12, 117.
- [35] 彭伟, 王芳, 王冀. 我国海洋可再生能源开发利用现状及发展建议 [J]. 海洋经济, 2022, 12(3): 70–75.
Peng W, Wang F, Wang J. Status and development suggestion for the development and utilization of ocean energy in China [J]. Marine Economy, 2022, 12(3): 70–75.
- [36] 广州能源所成功研建首台半潜式波浪能养殖平台“澎湖号” [EB/OL]. (2019-07-03)[2023-01-12]. https://www.giec.cas.cn/ttxw2016/201907/t20190703_5332070.html.
Guangzhou Energy Institute successfully developed and built the first semi-submersible wave energy breeding platform “Penghu” [EB/OL]. (2019-07-03)[2023-01-12]. https://www.giec.cas.cn/ttxw2016/201907/t20190703_5332070.html.
- [37] 中国南方电网有限责任公司. 世界首台 MW 级漂浮式波浪能发电装置下水调试 [EB/OL]. (2023-01-12)[2023-01-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c26962133/content.html>.
China Southern Power Grid Co., Ltd. The world's first megawatt-class floating wave energy power generation device was launched [EB/OL]. (2023-01-12)[2023-01-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c26962133/content.html>.
- [38] 张亚群, 盛松伟, 游亚戈, 等. 波浪能发电技术应用发展现状及方向 [J]. 新能源进展, 2019, 7(4): 374–378.
Zhng Y Q, Sheng S W, You Y G, et al. Development status and application direction of wave energy generation technology [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(4): 374–378.
- [39] 我市海洋科技创新成果转化实现重大突破——世界最大单机 LHD 1.6MW 潮流能发电 [EB/OL]. (2022-02-28)[2023-01-12]. <http://www.93kj.cn/html/web/kejixinxi/haiyangdianzixinxi/1518850950377320449.html>.
The transformation of marine science and technology innovation achievements in our city has achieved a major breakthrough—The world's largest stand-alone LHD 1.6 MW power stream energy can start generating electricity [EB/OL]. (2022-02-28)[2023-01-12]. <http://www.93kj.cn/html/web/kejixinxi/haiyangdianzixinxi/1518850950377320449.html>.
- [40] 张继生, 汪国辉, 林祥峰. 潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 220–232.
Zhng J S, Wang G H, Lin X F. A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 220–232.
- [41] 薛碧颖, 陈斌, 邹亮. 我国海洋无碳能源调查与开发利用主要进展 [J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 53–65.
Xue B Y, Chen B, Zou L. Main progress in investigation, development and utilization of marine carbon-free energy in China [J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 53–65.
- [42] 徐旭升. 玉环海山潮汐电站现状及保护利用建议 [J]. 浙江水利水电学院学报, 2022, 34(4): 67–68.
Xu X S. Protection and Utilization of Haishan Tidal Power Station in Yuhuan [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2022, 34(4): 67–68.
- [43] 付强, 王国荣, 周守为, 等. 温差能与低温海水资源综合利用研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 52–60.
Fu Q, Wang G R, Zhou S W, et al. Comprehensive utilization of temperature difference energy and low-temperature seawater resources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 52–60.
- [44] 国际船舶网. 七〇四所 MW 级海洋温差能发电设计方案获 CCS 颁发 AIP 认证 [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-03-21]. <https://new-energy.in-en.com/html/newenergy-2417209.shtml>.
International Ship Network. The 704 MW-level marine thermoelectric power generation design scheme was awarded AIP certification by CCS [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-03-21]. <https://new-energy.in-en.com/html/newenergy-2417209.shtml>.
- [45] 科学家实现高效率多形式盐差能发电 [J]. 世界环境, 2022 (5): 9.
Scientists achieve high-efficiency multi-form salt differential power generation [J]. World Environment, 2022 (5): 9.
- [46] 方芳. 海上光伏前景可期——中心助力海上光伏技术经验研讨会 [EB/OL]. (2022-06-16)[2023-03-03]. <http://www.notcsoa.org.cn/cn/index/show/3622>.
Fang F. Promising prospects for offshore photovoltaics—experience seminar on center assisted offshore photovoltaic technology [EB/OL]. (2022-06-16)[2023-03-03]. <http://www.notcsoa.org.cn/cn/index/show/3622>.
- [47] 黄翔. 海上光伏风生水起, 万华化学组团布局 [N]. 证券时报, 2022-12-07(A06).
Huang X. Offshore photovoltaic is booming, and Wanhua Chemical Group Layout [N]. Securities Times, 2022-12-07(A06).
- [48] 董梓童. 海上光伏迈向“深蓝” [N]. 中国能源报, 2022-06-13(012).
Dong Z T. Offshore PV towards “deep blue” [N]. China Energy News, 2022-06-13(012).
- [49] 赵金峰, 黄筱云, 陈理. 波浪能发电技术及研究现状 [J]. 湖南水利水电, 2022 (3): 7–11.
Zhao J F, Huang X Y, Chen L. Wave power generation technology and research status [J]. Hunan Hydro & Power, 2022 (3): 7–11.
- [50] 毛亚郎, 陈国波, 章怡. 海洋能开发的多能互补装置及分布式发电系统 [J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(11): 48–54.
Mao Y L, Chen G B, Zhang Y. Hybrid power equipment and distributed generation system of ocean energy [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(11): 48–54.