

风-浪联合开发技术研究现状及发展趋势

史宏达^{1,2}, 韩 治¹, 路 晴¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100;
2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:沿海城市经济增长对能源的需求进入新的阶段, 大力发展海上可再生能源, 促进能源结构绿色转型迫在眉睫。当前海上可再生能源中, 风能技术较为成熟, 已进入商业开发, 但受到成本因素制约; 波浪能作为海上风能的伴生资源, 通过风-浪联合开发, 可发挥协同效应, 降本增效, 并提高发电稳定性。目前, 风-浪联合开发技术形式尚未收敛, 主要研究目标为确立互利共赢的联合开发形式及研发安全、高效、低成本的联合开发机组。风-浪联合开发的发展趋势为以海上风电场为基础的大规模阵列化开发。为全面了解海上风-浪联合开发前景, 准确把握技术研究进展, 本文以风-浪发电的技术现状与需求为出发点, 综述联合开发的协同效应, 介绍机组的主要类型、技术形式和工程实例, 并对风-浪联合开发技术发展趋势做出展望。

关键词:海上风能; 波浪能; 多能互补; 技术形式; 联合开发

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)04-0328-12

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220517002

引用格式: 史宏达, 韩治, 路晴. 风-浪联合开发技术研究现状及发展趋势[J]. 海岸工程, 2022, 41(4): 328-339. SHI H D, HAN Z, LU Q. Research status and development trend of wind-wave co-development technology[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(4): 328-339.

随着全球人口增长和城市化进程加快, 能源需求日益增长^[1-3]。目前化石能源在能源消费中占比最大, 化石能源的使用会在开采、运输和使用等环节对水质和土壤等生态环境造成严重污染, 排放出的二氧化碳亦会引发温室效应, 加剧全球气候变暖^[4-5]。为应对气候危机, 加快构建我国现代能源体系, 推动能源高质量发展, 保障国家能源安全, 确保如期达成“双碳”目标, 国家发展改革委和国家能源局于 2022 年 1 月 29 日联合印发了《“十四五”现代能源体系规划》, 规划中指出“坚持生态优先、绿色发展, 壮大清洁能源产业, 实施可再生能源替代行动”^[6]。因此, 加快能源绿色低碳转型是推动我国能源高质量发展的迫切需要。

我国海岸线总长约为 3.2 万 km, 领海面积约为 300 万 km², 海洋可再生能源储量可观。在海洋可再生能源中, 海上风能技术成熟度等级 (Technology Readiness Levels, TRL) 最高, 目前已进入产业化阶段。据中国国家能源局数据显示, 2021 年我国海上风电新增装机 16.90 GW, 同比增长 339.53%, 增速创历史新高, 海上风电累计装机 26.39 GW, 居全球第一^[7]。国际能源署预计海上风能的发电量将于 2025 年和 2030 年分别达到 308 TW·h 和 606 TW·h^[8]。相比陆地风能, 海上风能能流密度大、稳定性好, 但运营维护成本也较高, 约占总投资的 25%~50%^[9-10], 因此, 海上风能发展存在成本限制。波浪能作为另一储量可观的海洋可再生能源, 具有品质好、易利用、能流密度较大、分布广泛等优势, 其技术类型尚未达到收敛, 目前正处于工程化与产业化的过渡阶段^[11]。波浪能与海上风能具有显著的伴生关系, 相较风能, 波浪能稳定性更高, 因此通过合理配置联合开发两种能源, 可发挥两者的协同作用, 既能分担基建、运营维护成本, 也可提高整体电力输出的稳定性, 优化电力质量, 推动海上可再生能源产业的健康发展。

收稿日期: 2022-05-17

资助项目: 国家重点研发计划项目——基于我国资源特性的海洋能高效利用创新技术研发 (2018YFB1501900)

作者简介: 史宏达 (1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋可再生能源开发与利用、港口和海岸工程等方面研究. E-mail: hd_shi@ouc.edu.cn

(李 燕 编辑)

1 海上风能、波浪能发电技术简述

1.1 海上风能发电技术现状简述

风是地球表面受太阳辐射不均导致空气流动而引起的一种自然现象,通过风力涡轮机可将空气动能转化为机械能或电能满足生产生活需要。人类在陆地利用风能的历史最早可追溯至公元前 4000 年的古埃及文明,古埃及人研制出了水平转动的风车^[12]。1887 年 7 月,世界上第一台风力发电设备于英国研制成功。相较于陆地风能,人类利用海上风能发电的历史较短,1991 年,世界上第一个真正意义上的海上风电场才正式投入运营。由于水面比陆地表面更为光滑,因此开阔水域的海风具有更大、更稳定的风速,同时在海上建立风电场可减少视觉、噪声等污染对人类的影响,节约土地面积,因此近年来海上风电逐渐成为研究热点^[13]。

针对海上风机的研究目前主要集中于水平轴风机与垂直轴风机(图 1),水平轴风机转轴方向与风来向平行,转轴较短,风能转换效率高,在大型风电机组中更为经济,是目前全球风电发展的主流机型^[14]。与水平轴风机相比,垂直轴风机转轴垂直于地面,受尾流效应影响较小,可多向受风且不需额外的偏航装置^[15-16],维护成本低,非常适合海上安装,因此也受到诸多研究者的关注。

风机在海上需根据布置海域水深选择合适的支撑形式(图 2)。固定式支撑主要分为重力式沉箱基础、单桩基础及导管架基础等,漂浮式支撑根据浮式平台的差异可分为半潜式、立柱式和张力腿式等^[17]。海上风机的电力传输需铺设海底电缆和电力设施,这些设施需要通过专业工程船只进行建造及维护,因此基建及维护成本高昂,是海上风电大规模部署的主要限制因素^[18]。尽管海风相比陆风更为稳定,但微小的风速变动仍会对提取功率产生极大影响导致电网波动,因此如何提高海上风电输出的稳定性也是海上风电研究的热点^[19]。

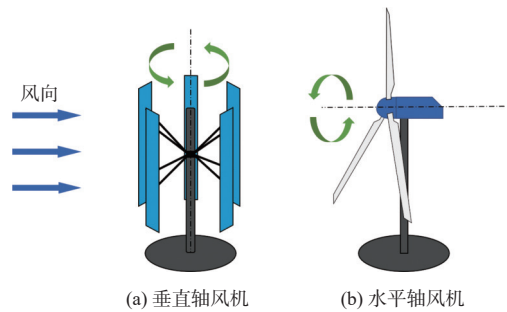


图 1 垂直轴风机与水平轴风机工作原理对比
Fig. 1 Comparison of the working principle of vertical axis and horizontal axis wind turbine

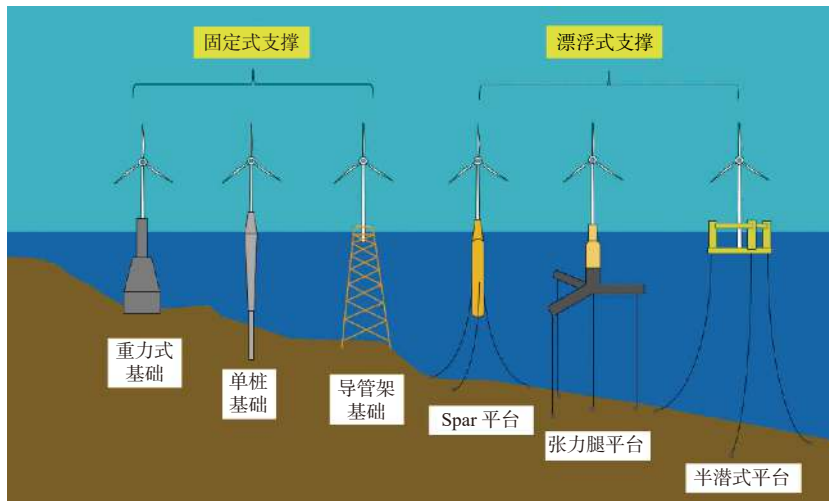
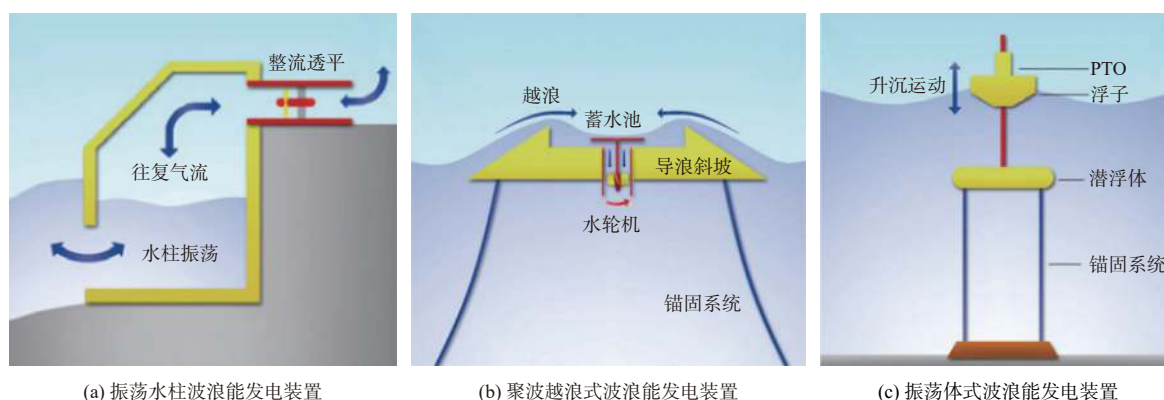


图 2 海上风机主要支撑形式
Fig. 2 Leading underpinning forms for offshore wind turbines

1.2 波浪能发电技术现状简述

波浪能储量及能流密度大,可靠性高,且对环境的影响小,极具开发潜力。据评估全球海岸线波浪能发电潜力达 1 TW,若考虑公海波浪能,其潜力可达 10 TW^[20]。波浪能与海上风能存在明显的伴生关系,海浪的形成源自海风与海面的相互作用。海-气边界层理论模型表明,海风的动量输入以短重力波为中心,主要将能量转化为波场中的高频波和慢速波,从而使它们逐渐成长为接近波谱峰值频率的主频波浪^[21]。

20 世纪 70 年代,为应对石油危机及气候变暖等问题,各国提出并研究了多种型式的波浪能利用装置,根据捕能原理可分为振荡水柱式、聚波越浪式及振荡体式三类(图 3)。其中,振荡水柱式装置通过波浪运动带动气室内水柱振荡,产生的往复气流带动空气透平转动进而发电,此类装置结构简单,可靠性高。聚波越浪式装置利用引浪斜坡使波浪攀升并将其导入后方高位蓄水池中,待蓄满足够水量后,利用回流管道将水体释入海中,在此过程中带动低水头水轮机进行发电,此类装置发电稳定性及可靠性高。振荡体式波浪能装置利用波浪带动振荡体往复运动,将波浪动能转化为振荡体动能,通过能量转换-传递机构,将振荡体动能转化为机械能或液压能,进而带动发电系统发电。



注:此图来源于文献[14]。

图 3 波浪能装置工作原理

Fig. 3 Working principle diagram of wave energy convertor

目前波浪能装置的研发目标主要为提高装置发电效率、增强装置鲁棒性、提高极端海况下装置的生存能力。波浪能产业正处于工程化与产业化的过渡阶段,下一步将向大型化、阵列化方向迈进,这对波浪能装置的成本控制提出了又一挑战。

2 风-浪联合开发协同效应研究

波浪能与海上风能伴生关系紧密,建立大规模阵列化海上可再生能源电场是两者共同的发展方向,海上风能-波浪能联合开发协同效应(synergy effects)显著。当前研究表明,风-浪联合开发的协同效应主要有以下 4 点。

1) 分摊并降低成本

波浪能与海上风能的开发所需基础设施互通,既要依托可靠的海上支撑结构,同时还需布设海底电缆、变电站等电力基础设施。Castro-Santos 等^[22]提出了一种评估海上浮式可再生能源系统全生命周期成本的方法,并针对 W2Power 和 Poseidon 两种海上浮式风-浪联合开发系统进行了案例分析,结果显示在全生命周期成本中占比重最重的是建造安装成本和运维成本。Clark 等^[23]通过成本模型对风-浪联合开发阵列与独立的风机阵列和波浪能阵列进行了成本对比,模拟结果显示,因成本分摊及发电量增加,联合开发阵列较独立阵

列更为经济。此外,一些研究也表明在前期调研和建造过程中同样可降低因重复资源评估、施工及资源调动产生的成本^[24-25]。运营及维护成本是目前海上风电场的另一重要支出,据统计,运维成本约占风电场总投资的 20%~25%^[26]。风机的可达性(accessibility)是评价海上风电场运维成本的重要指标。海上风机维护工作船工作的极限波高为 1.5 m,当超过该波高时,保养及维修工作将延期,从而导致维护成本的增加。如图 4 所示,风-浪联合开发可采用波浪能装置阵列保护海上风机阵列的方法,发挥波浪能阵列的掩蔽效应(shadow effect),为风机阵列提供良好的泊稳条件,从而提高电场检修的可作业天气窗口,降低维护成本^[27]。Astariz 等^[28]使用高分辨率数值模拟针对 Alpha Ventus 海上风电场进行了 15 种案例分析,结果表明在风电场外围布置波浪能装置阵列后,风电场的可作业天气窗口最多可增加 80%。此外,波浪能阵列的掩蔽效应可应用于部分风能资源优异但泊稳条件较差的海域以改善波浪条件,提供建立风电场的可能性。

2) 提升电力质量

由于气候的不可控性,尽管海上风能相较陆地风能更稳定,但也难以避免间隔与波动。风力发电取决于风速的立方,体现在风机能量输出上则为输出功率的随机性、波动性与不可控性。随着海上风电大量并网,不确定性因素的增加不仅影响电网的电压和频率稳定性,还将影响电网的潮流分布^[29]。Fusco 等^[30]的研究表明风机能量输出的变动会间接影响电网中热电厂的能量输出,显著影响热电厂效率,导致度电成本与碳排放量增加。因此将高份额的间歇性电力资源纳入电力供应系统,被认为是可再生能源可持续发展的主要挑战之一^[31-32]。为解决这一问题,通过可再生能源联合开发以降低发电功率的整体波动是目前研究的方向之一。相较海上风能,波浪能具有更好的可预测性与稳定性,由风、浪间的强伴生关系可知,风能资源丰富的海域,波浪能资源也相对丰富,而由风、浪传播速度的差异产生的波浪峰值波高与峰值风速间的时差可有效提高电力输出的稳定性。Cradden 等^[33]对欧洲 3 个海洋能测试场的综合海洋能测试平台的分析表明,由于风电场选址海域通常风速高、风区长,故随风生成的波浪到达风电场的时间延迟正好可弥补风力发电的空窗期,从而可提升电力输出质量。Astariz 和 Iglesias^[34]结合德国 Alpha Ventus 和丹麦 Horns Rev2 个风电场的风、浪数据对风-浪联合电场的发电表现进行了研究,结果表明对于同一位置的海上风电场,风-浪联合电场的停机时间及功率波动分别减少了 87% 和 6%,在风、浪相关性较弱的海域进行联合开发可以更具成本竞争力的方式推动可再生能源发展。Rasool 等^[35]针对澳大利亚新南威尔士州附近海域的 7 个站点进行了风-浪联合发电评估,结果表明 50% 的风、浪发电混合比是权衡发电量与电力输出波动的最优解。

3) 增强鲁棒性

深海海域(水深<100 m)比近海的风能资源更丰富,但同时波浪条件也更严峻。在恶劣海况下,浮式海上风机运动响应不仅影响风机的气动表现,降低风电产量,也会产生额外的结构荷载,威胁整体安全性。针对这一问题,将波浪能装置设计为浮式风机的被动阻尼系统,通过主动吸收波浪能以降低波浪对浮式平台的影响成为研究的新方向。Borg 等^[36]将搭载垂直轴风机的 Trifloater 半潜式平台与振荡浮子波能装置结合,研究了振荡浮子装置固有频率变化对浮式平台的影响。结果表明,当振荡浮子装置固有频率与平台固有频率匹配时,波浪能发电效率最高,当振荡浮子装置固有频率低于平台固有频率时,可有效降低平台运动响应,在特定波况下,平台的垂荡 RAO(Response Amplitude Operator)降低了 29%。Wan 等^[37-38]设计了一种基于 Spar 浮式平台的风-浪联合获能装置,该装置在 Spar 平台外围嵌套了一个环形振荡浮子波浪能装置,浮子可在波浪

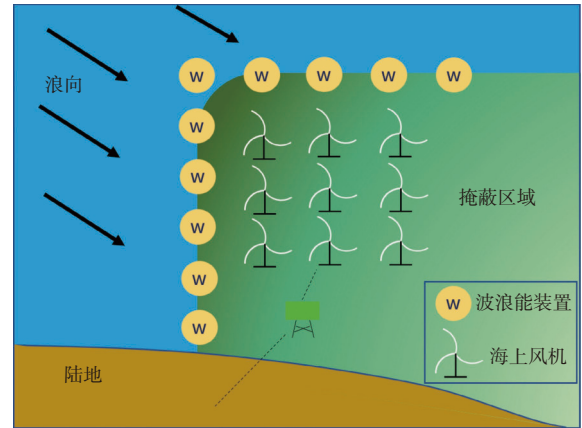


图 4 波浪能阵列掩蔽效应示意图

Fig. 4 Masking effect schematic of wave energy convertor array

作用下通过与 Spar 平台的相对运动发电,并通过数值模拟及物理模型试验针对极端风浪条件下振荡浮子的 2 种避险模式进行了测试。Michailides 等^[39]对基于半潜式平台的风-浪联合开发装置 SFC (Semisubmersible wind energy and Flap-type wave energy Converter) 进行了生存性能研究,试验及数值模拟结果表明该装置在极端环境下拥有良好的生存性能。Hu^[40]利用数值模拟对与振荡浮子阵列结合的半潜式海上风机平台进行了研究,结果表明振荡浮子阵列的增加减少了平台上的最大水平力与俯仰力矩,提高了平台的安全性。Kamarlouei 等^[41]将摆式振荡浮子阵列与半潜式风机平台相结合并研究了摆式浮子阵列对平台运动的影响,结果表明通过调节摆式浮子阵列可控制平台运动,针对平台类型优化 PTO (Power Take Off) 系统并采取主动控制方式的控制效果更佳。

4) 提高用海效率、促进监管程序协同

大多数海洋活动发生在约 50~100 km 的近陆海域,海上风能及波浪能的开发利用活动将与生态保护区、航运及渔业等其他海洋经济用地产生竞争。国家发展改革委及能源局的相关意见指出:建立清洁低碳能源开发利用的国土空间管理机制,优化海洋能源开发用地用海要求^[42]。风浪伴生关系使海上风能与波浪能开发具有相近的用海需求,考虑到海上风能、波浪能装置依托结构的相似性,风浪联合开发可提高近海空间利用效率,在海洋空间规划或海岸带综合管理中发挥协同作用。对处于发展变革阶段的技术,环境监管政策依赖的“最佳科学证据”往往缺乏明确的数据且存在影响的不确定性。欧盟等发达地区的环境监管部门倾向于对技术成熟度尚不及风能的波浪能电力项目采取严格的风险预防措施,因此波浪能项目的数据和监测成本高,审批时间长。对此,欧洲智能能源 SOWFIA (Streamlining of Ocean Wave Farms Impact Assessment) 项目提出了一系列建议,并对欧洲的波浪能影响评估及许可程序进行了深入分析^[43],希望根据海洋能源之间的相似性简化评估标准及许可程序。国际能源署-海洋能源系统 (International Energy Agency-Ocean Energy Systems, IEA-OES) 发布的报告梳理了海上风能及波浪能等装置的环境影响状况,以期减少监管部门对科学信息理解的不确定性^[44]。根据我国生态环境部颁行的《建设项目环境影响评价分类管理名录》(2021 年版)^[45],波浪发电与海上风电工程在一定装机容量范围内可采用同一类别形式的环境影响评价,风浪联合开发意味着环评及审批程序上的协同优势。在关键立法及监管政策的更新或细化中,同时考虑不同发展阶段中海洋能源技术的差异与协调,有利于形成技术发展规范化及监管完善化互相促进的良性循环。

3 风-浪联合开发模式及项目实例

风-浪联合开发依托单元类型不同,联合开发模式主要分为邻布型、混合型及能源岛型三种。

邻布型基于独立的海上风机和波浪能装置,通过在同一海域进行 2 种装置的阵列布置实现风-浪资源联合开发。根据波浪能装置阵列与海上风机阵列的布置关系,邻布型又可分为独立阵列、包围阵列、均布阵列及非均布阵列等型式(图 5)^[46]。目前由于波浪能装置商业化程度低,针对邻布型的风-浪联合开发尚处于理论研究阶段,研究主要集中于包围阵列下波浪能装置阵列的掩蔽效应对海上风机阵列的影响^[47-49]。

混合型风-浪联合开发注重将波浪能装置与海上风机集成于同一海洋平台上,以分担基建成本。根据平台类型,可分为底部固定式与漂浮式两类,其中固定式基础根据布置水深可分为重力式沉箱基础、单桩基础及导管架基础等,漂浮式支撑根据浮式平台的差异可分为半潜式、立柱式和张力腿式等。随着风、浪资源开发的深海化,漂浮式混合型风-浪联合开发装置成为目前研究的热点。振荡体式波浪能装置结构灵活多变,易于与风机平台结合,是混合型风-浪联合开发中主要的波浪能捕获机构。振荡水柱式波浪能装置结构简单且可靠性高,也具有与海上风机平台结合的潜力。

WindWaveStar 是丹麦 WaveStar 公司研发的固定式风-浪联合开发装置(图 6),该装置依托底部固定式海上平台,平台两侧安装有悬臂式振荡浮子阵列,可捕获波浪能发电,平台顶部可安装海上风机,进一步提高发电效率并降低安装成本。该装置 1:2 样机于 2009 年 9 月 18 日在丹麦 Hanstholm 投放,并于 2010 年 2 月成功并网发电^[50]。

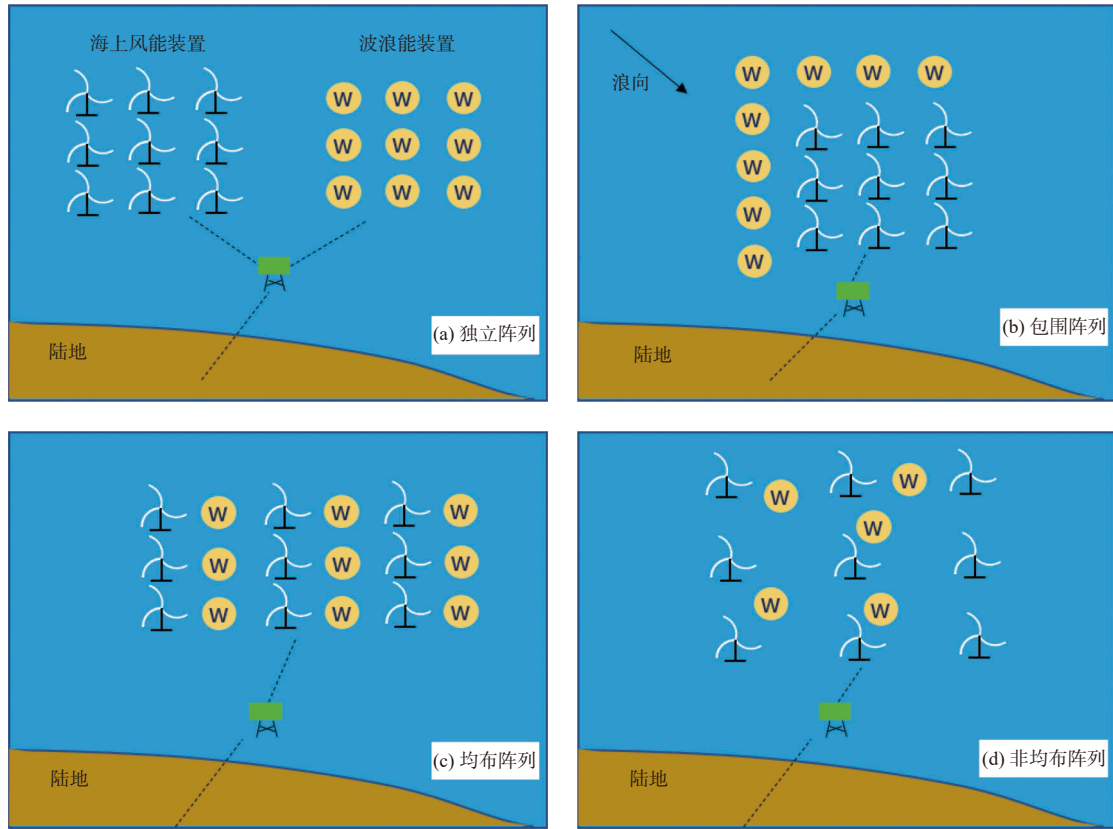
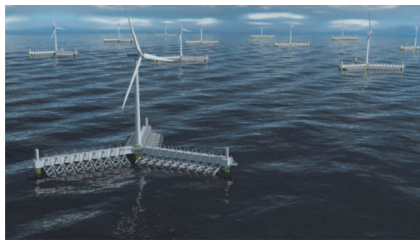


图 5 邻布型风-浪联合开发主要阵列型式

Fig. 5 The leading array types for joint wind-wave co-development of the adjacent type

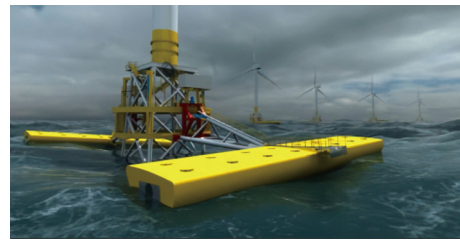
苏格兰 Green Ocean Energy 有限公司于 2010 年 5 月提出的固定式风-浪联合开发装置 Wave Treader (图 7) 主体为导管架基础海上风机, 2 个长条状振荡浮子通过悬臂与基础相连。条状浮子在波浪作用下发生振荡运动, 液压缸内的高压液压油驱动液压马达带动发电机发电。悬臂可绕导管架基础旋转或升降, 可最大限度利用来向海浪并适应潮差变化。充分利用现有海上风机基础设施实现最高效率发电是其设计宗旨, 据估计其波浪组件发电功率可达 500 kW, 与单一布置风机相比, 联合开发可显著提高所在海域发电量^[51]。



注: 此图来源于文献 [50]。

图 6 丹麦 WindWaveStar 固定式风-浪联合开发装置概念图

Fig. 6 Concept drawing of the Danish WindWaveStar fixed wind-wave co-development device



注: 此图来源于文献 [51]。

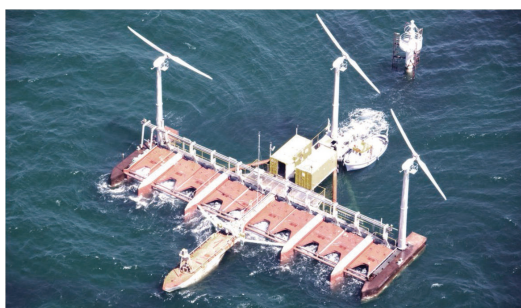
图 7 苏格兰 Wave Treader 固定式风-浪联合开发装置概念图

Fig. 7 Concept drawing of the Scotland Wave Treader fixed wind-wave co-development device

丹麦 Poseidon Floating Power 清洁能源技术公司研制的漂浮式风-浪联合电站 Poseidon 如图 8 所示, 该浮式电站可容纳 3 台风力发电机和多台波浪能装置, 其中波浪能装置包括振荡体式 and 振荡水柱式。根据需求, 全

尺寸的 Poseidon 装置长度范围在 80~150 m。2008 年, 1:4 比尺装置样机于丹麦近海进行了实海况测试, 样机长 37 m, 装载 10 台装置功率为 3 kW 的波浪能装置和 3 台 11 kW 的海上风机。据估计全尺寸的 Poseidon 装置可装载 2.6 MW 的波浪能装置和 2.3~5.0 MW 的海上风机^[52-53]。

WindWaveFloat 是美国 Principle Power 公司与美国国家可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 于 2012 年联合提出的一种风-浪联合开发装置设想, 装置基于 Principle Power 公司三柱半潜式海上风电漂浮式平台, 可布置于水深 45 m 以上的海域捕获海上风能(图 9)。该平台具有丰富的甲板空间可用于布置波浪能装置, 经对该装置风-浪联合开发的技术可行性及经济性的评估表明, 风、浪能量捕获设备集中在 1 个平台上, 2 种装置可通过共用电缆、电力传输设备及其他通用设备节省总投资及运营开支, 在经济性及运营方面潜在优势突出。波浪能装置的加入也提升了单平台的能源产出, 可间接降低能源成本^[54-55]。



注: 此图来源于文献 [53]。

图 8 丹麦 Poseidon 漂浮式风-浪联合电站 1:4 样机
Fig. 8 Denmark Poseidon floating wind-wave co-development
1:4 power plant prototype



注: 此图来源于文献 [54]。

图 9 美国 WindWaveFloat 风-浪联合开发装置设想
Fig. 9 USA WindWaveFloat wind-wave co-development
device concept

为高效开发欧洲附近海域可再生能源与渔业资源, 欧盟与丹麦科技大学 (Technical University of Denmark) 联合启动了 Mermaid 项目, 该项目的可再生能源部分计划从 2012 年至 2016 年间于大西洋坎塔布连海域建立海上风-浪联合开发电场并投放约 77 个搭载风能及波浪能装置的多用途海上浮式平台, 据风、浪资源环境评估, 每个机组将搭载 5 MW 的海上风机和振荡水柱式波浪能装置, 预计年平均发电量将达 80 GW·h。Mermaid 项目计划研制的多用途海上浮式平台采用悬链线系泊, 可在 40~200 m 水深的范围下工作, 其中漂浮半潜式平台的 4 根支柱由三角形混凝土制成(图 10), 中心支柱用于安装 5 MW 海上风机机组, 四周 3 根支柱将安装振荡水柱式波浪能装置^[56]。

位于挪威的 Pelagic Power AS 公司于 2010 年提出的浮式风-浪联合开发装置 W2Power(图 11)采用三角形漂浮半潜式平台, 平台的 2 个端角各布置 1 台海上风机, 其余位置布置波浪能装置的能量装换系统, 布置于平台每边的振荡浮子式波浪能装置通过液压驱动能量转换系统。1 台 W2Power 装置可搭载 2 台 3.6 MW 海上风机, 额定总功率将超过 10 MW, 加之整合了波浪能装置, 使其在低风速条件下也可保持良好的发电功率和稳定性。该装置可在港口或堆场进行安装, 拖航运至目标海域, 安装建造成本低, 目前已到样机海试阶段并已进行并网发电测试^[57]。

我国目前虽尚无运行中的风-浪联合开发项目, 但首台漂浮式海上风电试验样机“三峡引领号”已于 2021 年 12 月在广东阳江沙扒三期海上风电场并网发电, 成为亚太地区首个投入商业化运营的海上浮动式风机(图 12)。该装置叶轮直径 158 m, 轮毂中心高度距海平面约 107 m, 风轮扫风面积相当于 3 个标准化足球场, 单机容量可达 5.5 GW。项目由中国三峡新能源(集团)股份有限公司牵头, 形成了从设计到施工和装备的一体化新型浮式风机及基础技术, 并以此为基础投资建设了首座国产半潜浮动式海上风电样机工程, 打通了技术研发、工程设计、样机工程、示范研究和推广应用等浮式海上风电全流程, 为我国的风-浪联合开发奠定了

技术基础^[58]。

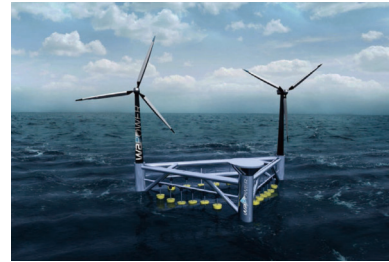
能源岛型风-浪联合开发模式是指以建造大型海上多用途平台为基础进行多种海洋可再生能源开发。相较混合型风-浪联合开发模式,能源岛型建造的海上平台规模较大,分为人工岛和人工浮岛两种类型。人工岛式能源岛一般在小岛或暗礁基础上建造,通过填海造陆或合并数个自然小岛扩充岛屿面积;人工浮岛是大型海上平台,通常小于人工岛,大于普通船只^[46]。

能源岛型联合开发模式建造成本较高,目前处于概念设计阶段。与人工岛式能源岛最接近的是荷兰 DNV KEMA 咨询公司提出的能源岛概念(图 13),该岛主体为围绕 50 m 深水库的环状堤坝构成的人工岛,可通过海上风能或其他可再生能源发电蓄水,利用水库排水提供持续稳定的能量输出^[59]。



此图来源于文献 [56]。

图 10 丹麦 MERMAID 项目多用途海上浮式平台
Fig. 10 Denmark multipurpose offshore floating platform for MERMAID project



注: 此图来源于文献 [57]。

图 11 挪威 W2Power 浮式风-浪联合开发装置
Fig. 11 Norwegian W2Power floating wind-wave co-development device



注: 此图来源于文献 [58]。

图 12 中国“三峡引领号”海上浮动式风机施工图
Fig. 12 Construction drawing of China's "Three Gorges Leading" offshore floating wind turbine



注: 此图来源于文献 [59]。

图 13 荷兰 DNV KEMA 能源岛概念设计图
Fig. 13 Concept drawing of the Netherlands DNV KEMA Energy Island

英国 Energy Island 公司自 2010 年起致力于海洋热能转换技术(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)研发,并以此为基础深入研究以 OTEC 为核心的人工浮岛式能源岛技术,提出了一种 50 MW Platform 概念设计(图 14),该设计除海洋热能外,还可在岛上建造风机开发海上风能资源。此外,该公司还设计了一种名为 Lilypad 的柔性膜波浪能发电装置,装置由两层薄膜构成,可利用波动引起的薄膜间相对运动驱动软管泵产生液压,从而带动涡轮电机发电^[60]。

2021 年丹麦气候、能源与公共事业部(The Danish Ministry of Climate, Energy and Utilities)公布丹麦将在距日德兰半岛海岸 80 km 处建造全球第一个能源岛型人工岛屿(图 15)。该岛造价 340 亿美元,将作为电力中心把附近数百个海上风机生产的绿色电力直接输送到北海周边国家,预计首期可满足 300 万欧洲家庭的用电需求^[61]。据报道,在未来能源岛将增加波浪能发电装置用以研发测试风-浪联合开发的潜力,预计 2030 年波浪能发电将成为丹麦电力组成的一部分^[62]。



注：此图来源于文献 [60]；右侧圆弧为 Lilypad 柔性膜波浪能装置。

图 14 英国 Energy Island 50 MW Platform 概念设计图

Fig. 14 Energy Island 50 MW Platform concept design in the UK



注：此图来源于文献 [61]。

图 15 丹麦海上风电能源岛概念图

Fig. 15 Concept drawing of Danish offshore wind energy island

4 风-浪联合开发技术发展趋势

化石能源的开发与利用支撑了工业革命,推动了人类社会的发展与繁荣,但也带来了无法避免的环境问题。波浪能与海上风能间存在显著伴生关系,风、浪资源可通过联合开发实现分摊建造及运营成本,优化电力质量,增强生存性能,提高用海效率及简化监管程序等协同效应,具有提供大量清洁可再生能源的潜力,可成为解决气候问题、推动能源结构绿色转型的重要推力。

然而目前风-浪联合开发技术尚不成熟,仍面临以下问题:①波浪能装置技术尚不成熟,无法采取邻布型模式组成波浪能-风机阵列进行联合开发;②在混合型模式中,波浪能装置与海上风电装置的结合方式尚未收敛;③风-浪联合开发对环境选址要求较高。

基于以上问题,风-浪联合开发研究首先应着眼于技术研发,推动风、浪资源捕获技术发展,提高能量捕获效率与装置可靠性;其次,明确风、浪资源能量捕获结合形式,合理分配两者功能侧重,充分发挥两者协同效用,实现双赢;最后,根据布置海域具体特点,因地制宜,灵活选取风、浪资源联合开发形式,切实降低安装及运营成本。

随着海上风能技术的飞速发展,风、浪资源联合开发受到了西方各国及研究者的关注,美国、英国、丹麦和挪威等国已设立项目投入资金进行大量相关研究,部分项目已进入实海况并网测试阶段。我国目前虽无相关实验样机,但已发展出具有自主知识产权的浮式风电技术,具备进行风-浪联合开发的技术支撑。风-浪联合开发技术将随海上风能及波浪能技术的发展日益成熟,发挥两者间的协同效应,将极大推动海洋可再生能源产业的发展。

5 结 语

本文以风能和波浪能发电的技术现状与发展需求为出发点,综述了风-浪联合开发的协同效应,介绍了联合开发模式的 3 种类型,通过工程实例对各种模式的技术形式、研究现状和发展方向进行了梳理。研究发现,风-浪联合开发形式尚未完成收敛,当前主要研究目标为确立协同互利的联合开发形式及研发安全高效经济的联合开发机组,以海上风电场为基础的大规模阵列化开发是风-浪联合开发的发展趋势。

风-浪联合开发从基础研究逐渐发展至示范阶段,开发技术日益成熟,部分装置已进入商业化运行阶段。以海上风电场技术为基础的风-浪联合开发,还可有效提高电场电力产量及质量,降低运维成本,还可利用掩蔽效应,不断开拓适宜风-浪联合开发的海域,是实现风-浪联合开发商业化,海洋可再生能源利用规模化的重要途径。

参考文献 (References):

- [1] VALIPOUR M. A comprehensive study on irrigation management in Asia and Oceania[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 61(9): 1247-1271.
- [2] VALIPOUR M. Future of agricultural water management in Africa[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 61(7): 907-927.
- [3] VALIPOUR M. Drainage, waterlogging, and salinity[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(12): 1625-1640.
- [4] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[C]//MASSON-DELMOTTE V. Working group I contribution of to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. The United Kingdom: Cambridge University Press, 2013: 916.
- [5] HOVENDEN M, NEWTON P, OSANAI Y. Warming has a larger and more persistent effect than elevated CO₂ on growing season soil nitrogen availability in a species-rich grassland[J]. *Plant Soil*, 2017, 421(1): 417-428.
- [6] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022-01-29)[2022-08-28]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. On the issuance of the "14th Five-Year Plan" of the modern energy system notice[EB/OL]. (2022-01-29)[2022-08-28]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- [7] 国家能源局. 2021年我国新增“风光”装机破亿千瓦[EB/OL]. (2022-02-09)[2022-08-28]. https://www.baidu.com/link?url=2Uxtbd4LUUc5dMBIyi32iBnZRDr3iqM7S7ie7WPjtmA8DW318_mGp0FSAlleG9DYzqKBh_xw7BlqwwqGbcopGLq3fWYCGzwAkfmIf02j2gmv21q5n9IGTnU4hd413k5&wd=&eqid=fb98fb120001f5a500000046369fe16. National Energy Administration. In 2021, China's new "wind and photovoltaic power" installed capacity of more than 100 million kilowatts[EB/OL]. (2022-02-09)[2022-08-28]. https://www.baidu.com/link?url=2Uxtbd4LUUc5dMBIyi32iBnZRDr3iqM7S7ie7WPjtmA8DW318_mGp0FSAlleG9DYzqKBh_xw7BlqwwqGbcopGLq3fWYCGzwAkfmIf02j2gmv21q5n9IGTnU4hd413k5&wd=&eqid=fb98fb120001f5a500000046369fe16.
- [8] International Energy Agency. Offshore wind outlook 2019[EB/OL]. (2019-10-25)[2022-08-28]. <http://resp.llas.ac.cn/C666/handle/2XK7JSWQ/270186>.
- [9] DALGIC Y, LAZAKIS I, DINWOODIE I, et al. Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 101: 211-226.
- [10] EDESESS A J, KELLIHER D, ALISTAIR G L, et al. Offshore monopile in the southern North Sea: Part I, calibrated input sea state[C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering. London: Thomas Telford Ltd, 2017: 122-132.
- [11] 史宏达, 刘臻. 海洋波浪能研究进展及发展趋势[J]. *科技导报*, 2021, 39(6): 22-28. SHI H D, LIU Z. Research progress and development trend of ocean wave energy[J]. *Science & Technology Herald*, 2021, 39(6): 22-28.
- [12] 陈洪澜. “风车王国”与风车村[J]. *世界文化*, 2018(4): 50-53. CHEN H L. “Windmill kingdom” and windmill village[J]. *World Culture*, 2018(4): 50-53.
- [13] International Energy Agency. IEA wind energy annual report 2008[R/OL]. (2009-06-01)[2022-08-28]. <https://docs.wind-watch.org/IEA-wind-annualreport-2008.pdf>.
- [14] SUN X J, HUANG D G, WU G Q. The current state of offshore wind energy technology development[J]. *Energy*, 2012, 41(1): 298-312.
- [15] 李战东. 垂直轴风力发电机气动性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. LI Z D. Study of aerodynamic performance of vertical axis wind turbine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [16] DABIRI J O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2011, 3(4): 1-12.
- [17] 陈嘉豪, 尹梓炜, 朱容宽, 等. 漂浮式海上风机平台阻尼结构设计与研究[J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 18-25. CHEN J H, YIN Z W, ZHU R K, et al. Design and research of foundation damping structure of semi-submersible floating offshore wind turbines[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 18-25.
- [18] MITCHELL D, BLANCHE J, HARPER S, et al. A review: challenges and opportunities for artificial intelligence and robotics in the offshore wind sector[J]. *Energy and AI*, 2022, 8: 1-36.
- [19] TIWARI R, BADU N R. Recent developments of control strategies for wind energy conversion system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 268-285.
- [20] MELIKOGLU M. Current status and future of ocean energy sources: a global review[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 148: 563-573.
- [21] PETER A E M, JANSSEN. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21(11): 1631-1642.
- [22] CASTRO-SANTOS L, MARTINS E, SOARES C G. Cost assessment methodology for combined wind and wave floating offshore renewable energy systems[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 866-880.
- [23] CLARK C E, MILLER A, DUPONT B. An analytical cost model for co-located floating wind-wave energy arrays[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 885-897.
- [24] ASTARIZ S, PEREZ-COLLAZO C, ABANADES J, et al. Co-located wave-wind farms economic assessment as a function of layout[J]. *Renewable Energy*, 2015, 83: 837-849.
- [25] ASTARIZ S, IGLESIAS G. Wave energy vs. other energy sources: a reassessment of the economics[J]. *International Journal of Green Energy*, 2016, 13(7): 747-755.
- [26] HASSAN G G. A guide to UK offshore wind operations and maintenance[EB/OL]. (2013-05-01)[2022-08-28]. <http://csmres.co.uk/cs.pub>

- [lic.upd/article-downloads/Offshore-wind-guide-June-2013-updated.pdf](#).
- [27] ASTARIZ S, IGLESIAS G. Enhancing wave energy competitiveness through co-located wind and wave energy farms. A review on the shadow effect[J]. *Energies*, 2015, 8(7): 7344-7366.
- [28] ASTARIZ S, PEREZ-COLLAZO C, ABANADES J, et al. Co-located wind-wave farm synergies (operation & maintenance): a case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91: 63-75.
- [29] 田书欣, 程浩忠, 曾平良, 等. 大型集群风电接入输电系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 34(10): 1566-1574. TIAN S X, CHENG H Z, ZENG P L, et al. Review of transmission planning for integrating large clusters of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 34(10): 1566-1574.
- [30] FUSCO F, NOLAN G, RINGWOOD J V. Variability reduction through optimal combination of wind/wave resources-an Irish case study[J]. *Energy*, 2010, 35(1): 314-325.
- [31] LUND H. Renewable energy strategies for sustainable development[J]. *Energy*, 2007, 32(6): 912-919.
- [32] LUND H, MATHIESEN B V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems-the case study of Denmark in years 2030 and 2050[J]. *Energy*, 2009, 34(5): 524-531.
- [33] CRADDEN L, MOUSLIM H, DUPERRAY O, et al. Joint exploitation of wave and offshore wind power[C]//Proceedings of the Ninth European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC). Southampton: EWTEC 2011 Proceedings, 2011: 5-9.
- [34] ASTARIZ A, IGLESIAS G. Output power smoothing and reduced downtime period by combined wind and wave energy farms[J]. *Energy*, 2016, 97: 69-81.
- [35] RASOOL S, MUTTAQI K M, SUTANTO D, et al. Quantifying the reduction in power variability of co-located offshore wind-wave farms[J]. *Renewable Energy*, 2022, 185: 1018-1033.
- [36] BORG M, COLLU M, BRENNAN F P. Use of a wave energy converter as a motion suppression device for floating wind turbines[J]. *Energy Procedia*, 2013, 35: 223-233.
- [37] WAN L, GAO Z, MOAN T. Experimental and numerical study of hydrodynamic responses of a combined wind and wave energy converter concept in survival modes[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 104: 151-169.
- [38] WAN L, GAO Z, MOAN T, et al. Experimental and numerical comparisons of hydrodynamic responses for a combined wind and wave energy converter concept under operational conditions[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 93: 87-100.
- [39] MICHAILIDES C, GAO Z, MOAN T. Experimental and numerical study of the response of the offshore combined wind/wave energy concept SFC in extreme environmental conditions[J]. *Marine Structures*, 2016, 50: 35-54.
- [40] HU J J, ZHOU B Z, VOGEL C, et al. Optimal design and performance analysis of a hybrid system combining a floating wind platform and wave energy converters[J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 1-16.
- [41] KAMARLOUEI M, GASPAR J F, CALVARIO M, et al. Experimental study of wave energy converter arrays adapted to a semi-submersible wind platform[J]. *Renewable Energy*, 2022, 188: 145-163.
- [42] 国家发展改革委, 国家能源局. 《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》[EB/OL]. (2022-01-30)[2022-08-28]. https://www.baidu.com/link?url=XMezXDCGZ_xG1URTxty4y1kqG_nylv0wT2hOIxpSwHlpWsokAXgkFg88RDz_hV2l4gZ6yAFr8YL7BHT_t29ciB409xh8duNFE7F6BnxBe&wd=&eqid=8fd2080b00082a0200000006636a7cf0. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Opinions on improving institutional mechanisms and policy measures for green and low-carbon energy transition[EB/OL]. (2022-01-30)[2022-08-28]. https://www.baidu.com/link?url=XMezXDCGZ_xG1URTxty4y1kqG_nylv0wT2hOIxpSwHlpWsokAXgkFg88RDz_hV2l4gZ6yAFr8YL7BHT_t29ciB409xh8duNFE7F6BnxBe&wd=&eqid=8fd2080b00082a0200000006636a7cf0.
- [43] TETHYS. SOWFIA: streamlining of ocean wave farms impact assessment[EB/OL]. (2012-12-04)[2022-08-28]. <https://tethys.pnnl.gov/stories/sowfia-streamlining-ocean-wave-farms-impact-assessment>.
- [44] Ocean Energy Systems. The state of knowledge for environmental effects[R/OL]. (2018-01-01)[2022-08-28]. https://www.etipocean.eu/knowledge_hub/the-state-of-knowledge-for-environmental-effects/.
- [45] 中华人民共和国生态环境部. 建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202012/t20201202_811053.html. (2020-11-30)[2022-08-28]. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Construction project environmental impact assessment classification management list (2021 edition) [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202012/t20201202_811053.html.
- [46] PEREZ-COLLAZO C, GREAVES D, IGLESIAS G. A review of combined wave and offshore wind energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 141-153.
- [47] ASTARIZ S, PEREZ-COLLAZO C, ABANADES J, et al. Hybrid wave and offshore wind farms: a comparative case study of co-located layouts[J]. *International Journal of Marine Energy*, 2016, 15: 2-16.
- [48] ASTARIZ S, IGLESIAS G. Co-located wind and wave energy farms: uniformly distributed arrays[J]. *Energy*, 2016, 113: 497-508.
- [49] ASTARIZ S, PEREZ-COLLAZO C, ABANADES J, et al. Towards the optimal design of a co-located wind-wave farm[J]. *Energy*, 2015, 84: 15-24.
- [50] GHAFARI H R, GHASSEMI H, HE G H. Numerical study of the wavestar wave energy converter with multi-point-absorber around Deep-Cwind semisubmersible floating platform[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 1-17.
- [51] PEREZ-COLLAZO C, GREAVES D, IGLESIAS G. A review of combined wave and offshore wind energy[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 141-153.
- [52] ROY A, AUGER F, DUPRIEZ-ROBIN F, et al. Electrical power supply of remote maritime areas: a review of hybrid systems based on ma-

- rine renewable energies[J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1-27.
- [53] MCTIERNAN K L, SHARMAN K T. Review of hybrid offshore wind and wave energy systems[C]//*Journal of Physics: Conference Series*. Bristol: IOP Publishing, 2020, 1452(1): 1-9.
- [54] AUBAULT A, ALVES M, SARMENTO A, et al. Modeling of an oscillating water column on the floating foundation WindFloat[C]// *International conference on offshore mechanics and Arctic engineering*. Berlin: AMSE, 2011, 44373: 235-246.
- [55] RODDIER D, BANISTER K. WindWaveFloat (WWF): final scientific report[EB/OL]. Principle Power Inc. , Seattle, WA United States, 2012. [2022-08-28]. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1057931>.
- [56] SARMIENTO J, ITURRIOZ A, AYLLON V, et al. Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 761-773.
- [57] LEGAZ M J, CORONIL D, MAYORGA P, et al. Study of a hybrid renewable energy platform: W2Power[C]//*International conference on offshore mechanics and Arctic engineering*. Berlin: AMSE, 2018, 51326: 1-9.
- [58] 中国能源网. “三峡引领号”国内首个海上浮动式风力发电机系统装备[EB/OL]. (2021-12-16)[2022-08-28]. http://www.cnenergynews.cn/zhuanti/2021/12/16/detail_20211216113637.html. China Energy Network. “Three Gorges Leading” China’s first offshore floating wind turbine system device[EB/OL]. (2021-12-16)[2022-08-28]. http://www.cnenergynews.cn/zhuanti/2021/12/16/detail_20211216113637.html.
- [59] DE BOER W W, VERHEIJ F J, ZWEMMER D, et al. The energy island—an inverse pump accumulation station[EB/OL]. (2007-10-01)[2022-08-28]. https://cdn.plataformaurbana.cl/wp-content/uploads/2007/10/721137884_paperenergyislandewec2007.pdf.
- [60] Energy Island. Lilypad-wave energy conversion[EB/OL]. [2022-08-28]. <http://energyisland.com/projects/lilypad/lilypad.html>.
- [61] News Without Politics. Denmark to build massive wind energy island[EB/OL]. (2021-02-05)[2022-08-28]. <https://newswithoutpolitics.com/2021/02/05/denmark-to-build-massive-wind-energy-island/>.
- [62] Ocean Energy System. OES annual report 2021[EB/OL]. (2022-03-04)[2022-08-28]. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-annual-reports/document/oes-annual-report-2021/>.

Research Status and Development Trend of Wind-Wave Co-development Technology

SHI Hong-da^{1,2}, HAN Zhi¹, LU Qing¹

(1. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The demand for energy from the economic growth of coastal cities has entered a new stage, and it is urgent to vigorously develop offshore renewable energy and promote the green transformation of energy structure. Among the current offshore renewable energy sources, wind energy technology is more mature and has entered commercial development, but is constrained by cost factors; wave energy, as a symbiotic resource to offshore wind energy, plays a synergistic effect through wind-wave co-development to reduce costs and increase efficiency, and improves the stability of power generation. The main research objectives are to establish a mutually beneficial and win-win co-development patterns and to develop safe, efficient, and low-cost co-development set of devices, due to the wind-wave co-development technologies have not yet converged. The development trend of wind-wave co-development is large-scale array development based on the offshore wind farms. In order to fully grasp the prospects of offshore wind-wave co-development and accurately get hold of the technological research progress, the current situation and demand of wind-wave power generation is taken as the starting point, the synergistic effects of co-development is reviewed, the main types of set of devices, technical forms, and engineering examples are introduced, and the outlook on the development trend of wind-wave co-development technology is made in this paper.

Key words: offshore wind energy; wave energy; multi-energy complementarity; technical forms; co-development

Received: May 17, 2022