

我国海上风电多能融合发展战略研究

程兵^{1,2*}, 朱琳^{1,2}, 郑宏林^{1,2}, 吴英^{1,2}, 付强^{1,2}

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 海洋天然气水合物全国重点实验室, 北京 100028)

摘要: 海上风电是保障能源安全、实现“双碳”目标和发展海洋经济的重要潜力方向, 但单一的开发模式已难以满足海洋资源立体开发和产业协同的需求, 推动其与其他能源资源融合开发是未来大势所趋。本文分析了我国发展海上风电多能融合开发具备的基础和优势, 全面梳理了海上风电与油气、氢能、光伏、波浪能、海洋牧场融合开发以及综合能源岛等六种模式的特点、国内外发展现状及挑战, 并凝练融合开发关键条件、构建融合开发决策流程, 从而提出未来发展战略目标和对策建议。研究认为, 在资源层面应加强规划引领, 统筹风电国家管辖海域开放与开发布局, 结合资源叠合分布情况做好开发规划; 在技术层面应加大海上氢能制造、储存及运输技术和微电网动态调节技术等多能融合关键技术研发力度; 在经济层面应强化产业协同能力, 通过模块化、标准化建造和产业联盟等策略多措并举降低开发成本。

关键词: 海上风电; 多能融合; 模式评价; 开发决策流程

中图分类号: TK01; P743 **文献标识码:** A

Multi-Energy Integrated Development of Offshore Wind Power in China

Cheng Bing^{1,2*}, Zhu Lin^{1,2}, Zheng Honglin^{1,2}, Wu Ying^{1,2}, Fu Qiang^{1,2}

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. State Key Laboratory of Offshore Natural Gas Hydrate, Beijing 100028, China)

Abstract: Offshore wind power is a major potential direction for ensuring energy security, achieving carbon neutrality goals, and fostering the marine economy. While a single development model can't meet the requirements of three-dimensional development of marine resources and industrial synergy, integrated development of offshore wind power with other offshore energies and resources is becoming the trend for future. This study analyzes the advantages regarding the multi-energy integrated development of offshore wind power in China, reviews the characteristics, domestic and international development trends, and challenges of six foundational models, including integration with offshore oil and gas, hydrogen, photovoltaic, wave energy, marine ranching, as well as integrated energy island. Key conditions for the integrated development are summarized, a decision-making process is established, and future strategic objectives and policy recommendations are proposed. The study suggests that at the resource level, planning guidance should be strengthened to coordinate the opening and development layout of national jurisdictional waters for wind power, while ensuring that development planning is effectively carried out based on the overlapping distribution of resources. At the technical level, efforts should be made for developing key technologies for multi-energy integration, such as offshore hydrogen energy production, storage, and transportation, as well as microgrid dynamic regulation. At the economic level, it is necessary to strengthen industrial collaboration and

收稿日期: 2026-03-04; **修回日期:** 2026-04-12

通讯作者: *程兵, 中海油研究总院有限责任公司高级工程师, 研究方向为海洋资源战略; E-mail: chengbing@cnooc.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海上能源一体化协同开发战略研究”(2025-HZ-30), “我国海洋经济高质量发展若干重大问题战略研究”(2025-JJZD-11)

本刊网址: sscac.eengineering.org.cn

reduce development costs through multiple strategies such as modularization, standardized construction, and industrial alliances.

Keywords: offshore wind power; multi-energy integration; development model evaluation; decision-making procedure of development

一、前言

“十五五”规划开局之年，我国将多能融合作为构建新型能源体系、建设能源强国的重要抓手，明确提出要深入实施非化石能源十年倍增行动，加快海上风电等清洁能源基地建设，推进海洋资源立体开发与综合利用^[1,2]。当前，我国海上风电累计装机规模已连续5年位居全球第一，“十五五”末预计突破 1×10^8 kW，但近海风电用海受限多、并网消纳困难已成为制约产业发展的核心瓶颈。同时，我国近海风能、油气、光伏、渔业等资源叠合分布特征显著，国家明确要求推行立体用海、集约用海^[3,4]，单一能源开发模式难以适配资源高效利用与产业协同发展需求，融合开发成为必然的发展方向。海上风电多能融合开发是通过风电与油气、氢能、光伏、海洋能、海洋牧场等多元业态协同耦合，可就地消纳绿电、共享基础设施、提升海域利用效率，是破解海上风电用海受限及消纳难题、实现海洋资源立体开发的必由之路，也是推动能源新质生产力发展、助力海洋强国建设的关键路径。

海上风电多能融合开发是能源安全的重要保障。在全球能源结构转型与地缘政治动荡的背景下，能源安全已成为国家战略的核心议题。海上风电作为可再生能源的重要组成，凭借其资源丰富、开发潜力大等优势，正成为保障能源安全的重要方向。我国海上风能资源丰富，根据国家气候中心最新数据显示，海上150 m高度、离岸200 km以内且水深小于100 m的海上风能资源技术可开发量约为 2.78×10^9 kW^[5]。根据全球风能理事会发布的《全球海上风电产业链发展报告2025》，截至2025年9月底，我国海上风电累计并网容量达到 4.461×10^7 kW^[6]，尽管已超过全球海上风电累计装机的一半，但与巨大的可开发量相比，占比不足1.5%，开发利用仍有巨大潜力。规模化开发海上风电，尤其是与光伏、海洋能、氢能等多能互补融合，可进一步挖掘资源潜力，有助于降低对化石能源的依赖，增强我国能源系统的韧性和自主可控能力。

海上风电多能融合开发有助于发展能源新质生

产力，助力实现碳达峰、碳中和（“双碳”）。海上风电具有显著的低碳属性，与其他能源深度融合，可以构建更加清洁、多元、灵活的能供体系，为沿海地区实现“双碳”目标提供关键支撑。当前，海上风电多能融合开发正加速从示范阶段迈向规模化、商业化应用，具有极大的发展潜力。海上风电与油气田电力系统互补供电模式，可显著降低平台碳排放量；“海上风电+制氢”有望解决海上就地消纳问题，大幅降低远海长距离输电成本；海上风电与海洋牧场、制氢、光伏、海洋能的融合开发以及以风电为基础的“综合能源岛”等新模式新路径，有助于实现海域空间资源的高效利用，有望成为海洋新质生产力的增长点。

海上风电多能融合开发是发展海洋经济，助力海洋强国建设的重要支撑。海上风电多能融合开发对技术创新要求高，可通过技术迭代带动高端装备制造、智能运维等新兴产业发展，形成经济增长新动能。海上风电产业链长，多能融合涉及的产业领域广，集合了当代高端装备制造的顶尖技术，可引领、辐射高端装备制造业发展，通过产业配套及产业组合，实现由风电整机制造向电气设备、叶片、齿轮箱、发电机等关键核心部件制造辐射扩展，进而实现海上风电全生命周期产业价值的深度挖掘，形成万亿级产业集群，为经济发展注入强大动能。此外，海上风电通过与油气田、海洋牧场、海洋能等多能互补融合发展，能够为海工装备制造业培育新的增长点，成为实施海洋强国战略的重要支撑^[7]。

当前国内海上风电多能融合开发的相关研究主要围绕技术适配、系统优化、模式落地三大方向开展，一是重点探索海上风电与油气、制氢、光伏等单一能源类型融合的技术可行性与装备适配方案，形成了首批示范工程的技术经验总结^[8,9]；二是聚焦“风-光-储-氢”多能耦合系统的功率平衡、协同控制、优化调度等技术方向，通过仿真模拟与算法迭代以有效提升融合系统运行的稳定性^[10,11]；三是针对不同海域资源禀赋特征分析区域融合开发模式与实施路径，提出了面向典型场景的项目模式建议^[12,13]。总体而言，现有研究多聚焦单一技术方向

或局部应用场景,对多种模式的全面梳理分析及评价仍有不足,尚未形成覆盖全业态、全链条的海上风电多能融合系统性分析框架与战略层面的顶层设计,对融合模式的评价和决策流程涉及较少,难以支撑产业规模化发展的决策需求。在此背景下,本文全面梳理海上风电与油气、氢能、光伏、波浪能、渔业融合开发及综合能源岛等六类模式的技术特点、发展现状与瓶颈问题,构建多能融合项目的综合评价指标体系与三阶决策流程,提出分阶段发展目标与针对性对策建议,以期为我国海上风电多能融合开发的顶层设计与产业实践提供决策参考。

二、我国发展海上风电多能融合的基础

(一) 我国海上风电快速发展为融合发展打下了坚实的技术及产业基础

我国近海风电的规模化与产业链成熟为风电多能融合提供了工程经验和降本路径。2024年全球海上风电机组60%的产能来自中国。得益于中国风电市场的蓬勃发展,根据《海上风电回顾与展望2025》,2024年全球新增装机容量排名前十的整机制造商中,中国企业占据七席^[14]。除了整机制造,我国已构建起覆盖设计、制造、施工、运维的全产业链体系。例如,在广东汕头等地,形成了覆盖从叶片、齿轮箱、发电机到轴承等关键部件制造,以及检验检测服务的完整产业生态。这种产业化优势直接转化为海上风电多能融合开发的降本动能。此外,近海项目积累的巨型风机吊装技术、抗台风设计经验及智能运维体系,为深远海浮式风电工程化提供了直接的技术迁移路径,也为多能融合项目提供了保障基础。

(二) 多种资源能源叠合分布使融合发展具备了物质基础

我国海上风能与多种能源具有叠合分布的物质基础。以南海区域为例,南海海域独特的资源禀赋为多能融合提供了天然载体。南海北部珠江口、琼东南、北部湾、莺歌海盆地等油气资源富集;南海平均风速范围为6.35~9.75 m/s,均值为7.76 m/s。在现有油气田区域,海南文昌、陆丰油田群附近的风能资源最丰富,海南东方气田群附近、广东其他油田群次之。南海盆地月平均太阳辐射总量为

190~260 W/m²,属于光资源较丰富区域^[10]。这种油气、风能、光能叠合的格局,为海上风电多能互补融合开发提供了物质基础,通过风能、光能为周边油气平台、养殖平台提供绿色电力替代,有助于实现单位海域产值倍增,实现海洋资源的立体开发。

(三) 我国海洋油气田基础设施为海上风电多能融合提供了依托设施

我国已经构建了成熟的海洋油气工业体系,为海上多能融合奠定了工程基础,现有油气田设施为风电多能融合提供了依托设施。以南海北部为例,现有80余个油气田(深水油气田11个);在基础设施方面,共有导管架平台79座、浮式生产装置10座、水下生产系统10余套、海底管道近4000 km;另有各类钻井平台、施工船提供作业保障。此外,南海海上电网通过“局部海上电力组网+孤岛供电”方案为油气田开发提供电力,电力组网主要分布在北部湾盆地的涠洲海域,珠江口盆地的文昌、恩平、番禺区块,已建电站中心平台40余个,这些基础设施可成为消纳海上风电的重要载体。基础设施复用有助于降低融合发展的成本,为规模化推广提供经济性保障。

三、海上风电多能融合开发模式发展现状

(一) 海上风电与油气融合开发模式

海上风电与油气融合开发指利用海上风电来协同开发海上油气田的模式。随着油气公司低碳转型的推进,海上油气开发对于绿电和减排的需求日益增长,海上风电与油气融合开发可以实现设施共用、发电直供、协同维护等,对减少油气平台碳排放、打造绿色油田有显著的推动作用。

当前,国际上海上风电与油气融合开发处于商业化起步阶段。挪威Hywind Tampen浮式风电场是全球第一个为海上油气田供电的海上浮式风电场^[15],离岸140 km,水深260~300 m^[16];其浮式基础为立柱式混凝土平台,配备了11台西门子股份公司歌美飒品牌的8.6 MW海上风机组,可满足Snorre和Gullfaks油田群35%的用电需求,突破了立柱式混凝土平台、动态系泊系统和协同供电技术。挪威的GoliatVIND浮式风电项目^[17]也在推进中,规划装机容量75 MW,电力用于Goliat FPSO

的油气生产，面临的关键挑战为半潜式钢制基础、深水锚泊技术有待突破。

我国已经开展了海上风电与油气融合示范应用。“海油观澜号”是我国首个海上浮式风电与油气融合开发项目^[18]（见图1），位于海南文昌离岸136 km、水深120 m海域，2023年5月成功并入文昌油田群电网；采用半潜式基础和单台7.25 MW风机，突破了半潜式浮体、动态缆、油田群微电网集成和台风季安全运行技术^[19]。此外，全球首例16 MW张力腿（TLP）浮式风电平台——中国海油陆丰油田群清洁能源电力供给改造示范项目已于2025年开工建设并稳步推进。

海上风电与油气融合开发模式面临的主要挑战为：海上油气田多采用化石能源供电，电网容量小，抗冲击能力弱。风电系统单机功率高、发电受环境条件影响，有明显的间歇性、随机性和波动性的特点，其动态行为不同于油气平台上常用的燃气轮机组，风电渗透率过高可能会引发严重的电网稳定性问题。

（二）海上风电与氢能融合开发模式

海上风电与氢能融合开发指利用海上风电直接驱动海水电解制氢，通过管道或船舶输送至岸上消纳或用于海上各类平台及装置使用。将风电的间歇性电力转化为可存储、可运输的氢能，可降低远距离输电成本，解决消纳问题，有望大幅增加风电可开发规模。分为三类模式：陆上电解制氢，通过海缆将电力输送至陆上电解槽制氢，适用于近岸；海上集中式制氢，适用于大型项目；海上分布式制氢，在单台风机平台集成模块化电解装置，节省投资但空间受限。

当前海上风电制氢项目欧洲占比较高，已进入



图1 “海油观澜号”深远海浮式风电平台

小规模示范阶段并已有商用级别的规划。荷兰PosHYdon项目是全球首个将退役油气平台改造为绿氢枢纽的示范工程，采用了兆瓦级的质子交换膜（PEM）电解槽。法国Sealhyfe项目是全球首个实现“浮式风电—海上制氢”全流程集成的示范项目^[20]，2023年6月开始生产全球首批深远海浮式平台绿氢；该项目已进入商业化准备阶段，正同步开发10兆瓦级浮式制氢平台。此外，挪威Deep Purple^[21]、德国AquaPrimus^[22]、英国Dolphyn^[23]等项目也在规划中。

我国仍处于海上制氢系统的研发攻关阶段，目前装置规模仍较小，2025年开展了全球首个海上千立方米PEM槽及制氢系统全功率测试^[24]，模块化系统每小时制氢量可达到1000 Nm³，突破了高耐久材料、高传质流场、高精度装配和高效率控制等技术，计划用于申能海南CZ2海上风电平台。此外，明阳阳江青洲四海上风场等多个项目均已预留制氢模块，预计未来几年内随着制氢技术的突破将实现融合应用。

海上风电与氢能融合开发模式面临的主要挑战为：海上制氢需克服复杂的风浪条件以及盐雾腐蚀等恶劣环境，如电解槽需采用特殊的防腐材料等；老旧油气管道改造输氢面临材料腐蚀、密封性下降等问题；储氢系统与现有电网的整合调度需要研发智能化管理系统；海上制氢成本高昂，仍需通过技术迭代实现降本。

（三）海上风电与光伏融合开发模式

海上风电与光伏融合开发利用同一海域空间同时布置海上风电和光伏系统，共用输电设施和运维平台，利用风能和太阳能的时空互补性，提高电力输出的稳定性。独立开发技术风险较低，但协同效应有限；集成开发可最大化利用平台空间，但技术要求高。

国际上海上风电与光伏融合开发正逐步迈向示范阶段。荷兰Hollandse Kust Noord风电场于2025年配置了0.5 MW的Nymphaea Aurora浮式光伏设施，并经受了风速为70 km/h的考验^[25]，后续将扩大规模。荷兰OranjeWind项目于2025年启动，计划集成5 MW的浮式光伏系统^[26]，拟采用海底锂离子电池与陆上超快速电池以平衡电网波动。

我国近海固定式风电与光伏融合开发已经有规

模化项目在推进, 奉贤1#海上光伏项目是全国首个海上“风光同场”市场化项目^[27], 利用已建奉贤海上风电场海域建设500 MW光伏阵列。对于漂浮式光伏与风电融合, 目前仍然处于小功率测试阶段。2024年8月, 离岸30 km、水深30 m的漂浮式光伏平台“黄海一号”^[28] (见图2) 在山东半岛南4号海上风电场开展了不可上浪型海上光伏平台的抗风浪能力、耐久性、可维护性、发电性能及耐候性能试验。2024年7月, 国家能源投资集团有限责任公司于2023年启动了100 kW离岸型海上漂浮式光伏项目^[29]在江苏通过航标效能验收, 项目布置了2个50 kW漂浮式浮体模块, 采用“半潜式钢框架+浮筒复合型结构”。

海上风电与光伏融合开发模式面临的主要挑战: 用海面积较大; 大面积光伏阵列遮蔽及“风光同场”运行对海洋生态的叠加影响等环评体系仍不完善; 漂浮式风光同场对海域环境条件要求较高, 需考虑海洋附着物重量, 组件需与浮体紧密贴合, 确保抵御海风、海浪冲击; 风电塔架晃动可能影响光伏浮体的结构强度; 漂浮方阵浮体间承受水平拉力大, 连接处易断裂造成倾覆事故。

(四) 海上风电与波浪能融合开发模式

海上风电与波浪能融合开发是一种集成海上风能、波浪能开发能力的综合开发模式。该模式可分为两者分开布置的邻布型和两者功能相对集中耦合的混合型, 混合型往往通过浮式基础平台支撑风力发电机组, 同时在平台下方或周边布设波浪能捕获装置 (如振荡浮子式或液压驱动式设备), 实现风浪融合开发。

欧洲已经开展了多项风浪融合开发的探索, 但由于波浪能发电的技术成熟度问题, 仍处在样机研发阶段。2019年, 英国 Marine Power Systems

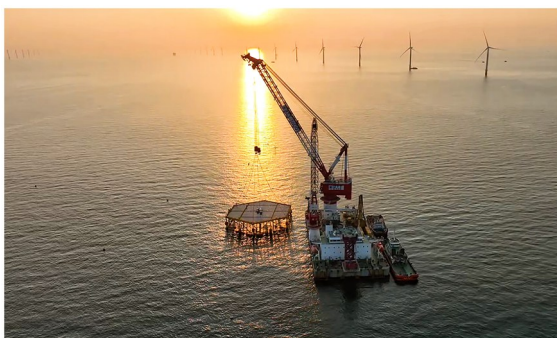


图2 风光融合浮式光伏平台“黄海一号”

推出 DualSub 浮式风浪联合发电装备原型机。2023年, 丹麦 Floating Power Plant A/S 公司提出 SEAWORTHY^[30]项目, 拟在西班牙大加那利岛测试站建设全球首个将漂浮式风电、波浪能与制氢技术集成于一体的商业化示范平台, 集成4.3 MW 漂浮式风力涡轮机、0.8 MW 波浪能转换器、1 MW 制氢电解槽^[31]。

我国风浪融合发电尚处于科研起步阶段, 相关探索较少, 广东大唐国际潮州发电有限责任公司于2023年启动了兆瓦级高效高可靠“漂浮式风机+波浪能”一体化发电平台关键技术研究, 规划一体化发电平台总功率 ≥ 10 MW, 波浪能装机功率 ≤ 0.5 MW^[32]。

海上风电与波浪能融合开发模式面临的主要挑战为: 风电与波浪能融合开发对环境选址的要求较高; 波浪能发电本身技术成熟度待提升, 仍以单一装置示范为主, 很难采用邻布型的“波浪能+风机”阵列方式去开展相关探索; 对于同一装置集成波浪能发电和风机的模式, 一方面对其结构形式仍需探索, 另一方面还需解决潜在干扰的问题。

(五) 海上风电与海洋牧场融合开发模式

海上风电与海洋牧场融合开发是将海上风电与海洋牧场建设相结合, 实现能源生产与渔业养殖的协同发展。风电可满足牧场设备用电需求, 如养殖网箱的增氧、投饵设备, 以及水质监测、视频监控等; 牧场则借助风电基础结构悬挂抗风浪网箱, 开展高附加值鱼类的规模化养殖; 基础结构还可作为人工鱼礁, 吸引海洋生物聚集栖息, 实现能源、渔业和生态多赢局面^[33]。

德国于2000年启动了“海洋牧场—海上风电场多用途利用先驱项目”, 后续西欧及北欧国家开始了海上风电与多类型海洋牧场融合的实践。2017年, 比利时 Edulis 项目证明了海上风电场中贻贝养殖的可行性。2024年11月, 荷兰“北海农场1号”项目投运, 利用风电机组间10 hm²海域开展规模化海藻养殖^[34]。2025年, 西班牙加那利群岛海洋平台试验场开展了 W2 Power 双涡轮风机组与水产养殖智能网箱技术融合测试^[35]。

我国风渔融合研究起步较晚但推进迅速, 2018年启动以来已有超过12个项目, 并已拓展“风渔+制氢”和“风渔+光伏”的探索。2024年投用的“伏羲一号”养殖水体达 6.3×10^4 m³, 是全球单体规模

最大的风渔融合网箱平台，采用“6桩+斜撑+双上部组块”桩基桁架式结构^[36]。广东阳江青洲四海上风电场“明渔一号”^[37]于2024年投运，首创“导管架风机网箱”一体化装备，养殖水体达5000 m³，并预留制氢接口。位于南日岛国家级海洋牧场示范区的“国能共享号”（见图3）是全球首个实现“风电+养殖+光伏”一体化的深远海综合平台^[38]。项目采用三立柱半潜式漂浮结构，顶部安装4 MW风机组，中层集成柔性光伏组件，中部是容积为1×10⁴ m³的正六边形养殖网箱，突破了漂浮式基础、风电机组适应性改造、动态海缆和锚泊系统等技术。

海上风电与海洋牧场融合开发模式面临的主要挑战为：风机对渔业养殖存在干扰问题，如风机运转产生的气流、噪声和各类检查维修作业可能会影响养殖环境；在协同管理上，风电运维周期与养殖周期存在差异，易出现管理冲突；电缆布设需避开养殖区域，增加了布局难度。

（六）综合能源岛模式

基于海上风电的综合能源岛是一种规模化开发海上风能，并集成多种海洋可再生能源生产、转换、储存与输送功能的综合性海上枢纽平台，可融合波浪能、光伏、储能、制氢、海水淡化等产业，形成“源-网-荷-储”一体化的能源供给体系。综合能源岛可实现多种能源高效集成与互补；具备空间和结构融合的优势，能够实现海上资源的立体化利用；还能通过配置储能设施、码头、小型机场等基础设施，形成产业集群效应。

国际上已开展基于海上风电的综合能源岛建设。比利时正在北海建造名为“伊丽莎白公主”的人工岛，岛基采用大型混凝土沉箱，已完成部分沉箱安



图3 全球首个漂浮式风渔融合项目“国能共享号”

装工作，将输送2.1 GW风电至陆地^[39]。位于丹麦北海日德兰半岛80 km外的VindØ人工能源岛^[40]已在规划中；该岛利用混凝土沉箱构建1.2×10⁵ m³人工岛，首期规划连接约3 GW的海上风电容量，未来将扩展至10 GW，并包括利用风电生产绿色氢气等能源转化设施。我国对于此类综合能源岛尚处在概念研究阶段。

综合能源岛模式面临的主要挑战为：目前我国对于综合能源岛的功能需求定位尚不清晰，具体应用场景仍待明确。综合能源岛占地面积大，海上工程建设成本较高；涉及众多技术领域，如风电、海洋能、储能、制氢、海水淡化等，需要跨学科协同创新，技术集成难度大。

四、海上风电多能融合开发面临的主要共性问题

（一）多种能源开发的厂址规划存在掣肘现象

在缺乏统一的资源评估和空间开发规划的背景下，海上多种能源开发之间存在区块重叠问题，将对油气开采、油气运输、航运航道、军事设施乃至生态环境造成影响。当前海上多能融合开发缺乏顶层统筹设计，不同能源类型各自独立布局，空间利用冲突频发，资源配置效率有待提升。同时，融合发展涉及地方政府、电力公司、电网企业等多元主体，职责和利益协调难度大，进一步加剧了规划执行中的不确定性。

（二）标准规范体系尚不完善，法律法规和政策支持不足

当前，海上风电多能融合开发仍处于起步阶段，在设备接口、安全生产、并网消纳等方面缺乏统一的技术规范和系统化标准，影响了规模化、集成化发展，尤其是复杂海洋环境下的设计、施工、运维标准对降低项目风险和保障安全极为重要。同时，我国在海洋多能融合领域的法律法规尚不完善，现行制度多以单一能源开发为导向，未能充分考虑融合场景下的权责划分与资源协调，如油气矿产与海上风电在开发使用权年限上的制度不衔接，易造成权属冲突。地方层面在电价补贴、审批流程等方面配套政策支持不足，导致风电、光伏等融合项目的备案与报批手续繁杂，周期较长。

（三）核心技术装备尚待突破，商业化应用面临成本和供应链挑战

海上风电多能融合在商业化过程中仍面临技术成熟度不足、核心装备依赖进口、系统集成难度大等多方面挑战。当前，关键技术主要集中在浮式基础、系泊系统、动态海缆、大容量风电机组等环节，其中部分技术虽已有示范应用，但整体仍处于研发或试验阶段，适应复杂海况和大规模部署的能力有限。同时，能源融合环节中的波浪能耦合发电、海上制氢、柔性直流输电等技术路线尚未形成完整的产业链，系统稳定性和经济性不足。部分关键部件如高压海缆附件、主轴承、控制系统等依赖进口，存在供应链不确定性。此外，国内在智能监测、模块化安装等方面仍有差距。

（四）就地消纳及稳定性方面仍亟待提高

我国海洋环境条件复杂，特别是南海东部区域常年受内波、强热带风暴和大尺度涌浪等自然现象干扰，对各类能源开发装置的结构安全和运行稳定构成显著挑战。在台风等极端天气频发区域，风机运行面临高风险，设备损耗与维护成本随之上升。同时，新建风电场普遍离岸距离较远，受天气、海况变化影响大，发电具有显著波动性，易引发功率输出不稳等问题。目前，电力系统在远海区域的就地消纳能力有限，电网接入与调度能力尚未形成有效配套，制约了风电输出的稳定传输与系统运行的安全性。

五、海上风电多能融合开发关键因素分析

（一）海上风电多能融合开发关键条件

为科学评估海上风电多能互补融合项目的可开发性，本研究基于全球典型案例的归纳分析，构建了覆盖资源、技术、市场、经济、环境等多个维度的指标体系评估框架（见表1）。指标构建坚持可获得性、可评价性与区域适配性相结合的原则，评价内容覆盖资源情况、适应性、技术装备水平、市场情况、经济性和环境友好性六大条件，作为风电融合项目优选和决策的核心依据。

（二）海上风电多能融合开发决策思路

基于海上风电多能融合开发评价指标体系，构建了海上风电多能融合开发决策流程（见图4），旨

在为项目立项、选址、评估及应用推广提供标准化的研判路径。流程第一步是对“资源禀赋及可获得性”的综合判断，涵盖各类能源的禀赋和分布情况，在此基础上进一步从受限情况、基础设施完备度、政策法规稳定性和市场准入难度4个维度评价资源可获得性，确保区域具有明确的现实开发可能性。第二步开展适应性、技术方案和市场需求等初步评估。“适应性评估”主要关注项目是否符合目标区域的环境与运行要求，包括环境条件适应性、安全性评估和可依托设施适配性，旨在判断目标区域是否具备实施条件；“技术方案评估”聚焦所采用技术的成熟度及总体工程方案的可实现性和未来创新潜力（如制氢预计未来几年有较大突破，则可预留接口）；“市场需求评估”需分析市场对项目产出的能源、副产品、碳汇等的需求程度及未来变化趋势。第三步开展进一步的详细评价，包括经济性评价和环境评价。经济性评价主要考察项目成本效益、市场竞争力、政策支持力度及是否可配套科研投入，判断其商业可持续性；环境评估则涵盖生态影响、社会影响及环境可持续性等内容，确保项目符合环保规定和绿色低碳发展要求。上述评估均通过后，方可进入海上测试与示范应用阶段，并根据技术成熟度和经济性研判是否推进规模化部署与商业化推广。该评估流程可为海上风电多能融合项目比选与决策提供参考。其中，资源的可获得性、技术方案的可行性与经济效益可达性是决定融合开发能否推进的3个核心因素。

（三）海上风电多能融合模式发展策略

聚焦技术成熟度、安全性、经济性三大关键要素，以列表形式全面评价不同类型的海上风电多能融合开发模式（见表2），其中技术成熟度按照国际通用标准的TRL1-TRL9表示，安全性按照优（安全性已经过长时间生产验证）、良（仅开展短时间示范、仍存在部分待评估的安全风险）、中（已证明存在一定安全风险但未来仍有望优化解决）、差（存在明显安全风险）划分等级，经济性按照优（经济性满足商业化成熟应用要求）、良（已示范应用但经济性仍需优化才可以满足商业化要求）、中（需配套较多科研投入或依托设施方可满足经济性）、差（经济性距离商业化有显著差距且短时间内不易突破）划分等级，在此基础上提出模式发展策略。

表1 海上风电多能融合开发评价指标体系

条件	评价依据	评价指标
资源情况	资源禀赋	风能资源：风速、风向稳定性、风能密度、季节分布等 油气资源：油气探明储量、经济可采储量等 太阳能：年总辐射量、日均有效光照时长、峰值及季节波动性等 海洋能：波浪能、潮流能、温差能等资源分布 渔业资源：养殖条件
	资源可获得性	受限情况：资源与军事区、航道、生态保护区等限制因素的重合情况及受限情况 基础设施完善度：交通、电力、港口等基础设施的建设情况 政策法规稳定性：评估当地政策法规对资源开发的支持程度和稳定性 市场准入难度：评估进入当地资源市场的难易程度
适应性	环境条件适应性	气候条件：极端天气频率、海况稳定性 地理条件：与能源需求区域的距离、电网接入条件
	安全性	技术可靠性：海上风电装置的结构强度、抗风浪能力 环境风险：极端气候条件对项目的影响
	可依托设施	现有能源设施：油气平台、已建风电场、海底输气管道 / 电缆、海上变电站、储能设施等
技术装备水平	技术成熟度	海上风电技术：评估装置总体结构性能及安装和运维的难度与成本 融合能种开发技术：波浪能发电、漂浮式光伏、海上制氢等技术成熟度 能源融合技术：评估系统集成的复杂性和效率、评估智能调度系统的可靠性 储能技术：评估储能设备的容量、寿命和效率，以及规模和成本
	技术创新潜力	新技术研发：评估新技术的研发和应用前景 技术突破：评估技术突破的可能性和方向
市场情况	市场需求	能源需求：评估碳汇指标需求、绿电需求、其他副产品需求（氢、渔等） 市场增长：评估市场未来发展需求
经济性	经济性评价	成本收益、政策支持力度、科研投入、现有设施可依托、市场竞争力等
环境友好性	生态影响	海洋生态系统：评估对海洋生态系统的破坏程度 鸟类迁徙：评估对鸟类迁徙路线和栖息地的影响
	社会影响	居民生活：评估对当地居民生活的影响 渔业活动：评估对渔业活动的影响
	环境可持续性评价	碳排放：评估项目全生命周期的碳排放水平 生态修复：评估生态修复措施的可行性和效果

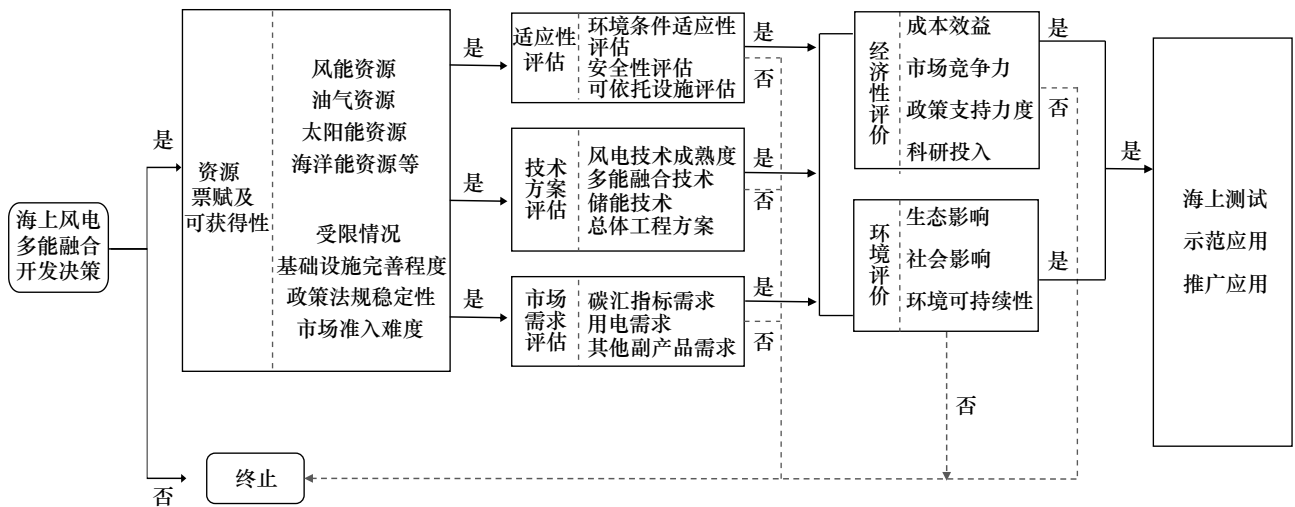


图4 海上风电多能融合开发决策流程

表2 海上风电多能融合开发模式评价

海上风电融合模式	典型项目	技术成熟度	安全性	经济性	关键制约因素
海上风电+油气	Hywind Tampen (商业化应用) “海油观澜号”(示范)	TRL8~9	优	良~优	发电渗透率、经济性
海上风电+氢能	法国 Sealhyfe 项目 (示范) 荷兰 PosHYdon (示范)	TRL7	良	中~良	海上制氢技术成熟度、储氢 运氢安全性
海上风电+光伏	固定式: 奉贤 1#海上光伏 (在建) 漂浮式: Kust Noord 风电场 (示范)	TRL8~9 TRL6	良~优 中	良~优 中	用海面积 用海面积、漂浮式光伏安全性
海上风电+渔业	荷兰“北海农场1号”(示范) “国能共享号”(示范)、“明渔一号”(示范)	TRL8~9	优	良~优	应用需求
海上风电+波浪能	丹麦 SEAWORTHY 项目 (规划)	TRL6	中~良	中~良	波浪能技术成熟度
综合能源岛	“伊丽莎白公主”人工岛 (在建)	TRL6~7	中~良	中	巨额投资、应用场景需求

成熟度最高的“海上风电+渔业”模式已经展现了良好的应用效果，宜因地制宜推广应用；“海上风电+油气”已有多项应用且前景广阔，但还需提高经济性及解决电网稳定性问题，建议通过技术升级、产业链和平台类型优化等进一步探索最佳的应用范式；“固定式风电+光伏”建议根据在建项目的后续运转情况合理确定下一步策略；对于“漂浮式风电+光伏/波浪能”，仍需要重点突破漂浮式光伏的安全性和波浪能发电的效率，取得突破后方可实现更好的融合；对于各类模式，待海上制氢技术突破后，融合制氢模式，可进一步提升融合开发的经济性和灵活性；由于海上风电的综合能源岛投资巨大，建议对国外项目保持关注，结合我国实际需求开展概念研究。

六、我国海上风电多能融合开发发展目标及对策建议

(一) 发展目标

近期（未来5年）为模式探索阶段，重点推进模式探索与先导验证。通过系统勘查海上各类能源资源叠合分布特征，摸清各类能源资源叠合分布情况，明确多能融合开发的资源基础；开展海上风电与油气、制氢、海洋能、养殖等融合技术试验，完成关键装备可行性论证；在具备条件的海域启动示范项目，初步验证典型融合模式的运行效能，同步探索建立适应融合开发的海域管理制度框架。

中期（至2035年）为规模推进阶段，着力实现技术产业化与规模推进。突破核心技术、装备国产化瓶颈，形成具备自主知识产权的技术体系；建成多个海上风电多能融合示范基地，确立若干经工程

验证的典型成熟开发模式；显著提升示范项目经济竞争力，同步构建覆盖项目审批、电力交易与生态保护等的法规体系，为商业化推广奠定制度基础。

远期（至2050年）为深度融合阶段，全面实现海上风电多能深度融合与产业生态构建。推动海上风电多能融合进入全面商业化阶段，形成覆盖能源生产、装备制造与衍生服务的完整综合利用产业链；将传统单一能源开发升级为高效协同的海洋综合能源生产体系，显著提升海洋资源综合利用效能；最终建成技术先进、经济高效、生态友好的海上多能融合开发系统，支撑海洋强国建设。

(二) 对策建议

1. 资源层面——强化规划引领，统筹国管海域开放与开发布局

建议强化海域开发的顶层设计与统筹协调。推进国管海域能源资源叠合分布的全面勘查评估与风电场址开发建设规划，制定国管海域适当或者分期开放的相关政策，加快推动深远海浮式风电场规模化建设。针对海上风电场与油气矿权等其他资源叠合分布的问题，完善海域立体分层设权制度，探索风电、渔业、航运等多用途兼容模式，合理规划用海，加大资源勘查力度，优先考察风能、光伏、地热、油气资源的叠合分布情况，摸清资源储量、品质及分布区域，建立叠合分布图谱，为后续融合开发提供数据支撑。

2. 技术层面——加大海上风电多能融合开发关键技术研发力度

建议推动“产学研用”，加快实现海上风电多能融合开发关键技术的研发和转化应用（见表3），对于首创性项目给予科研配套支持，支撑集中突破

表3 海上风电多能融合开发关键技术及突破方向

技术类别	关键技术	突破方向
海上风电开发技术	浮式风电基础及系泊系统技术	模块化、标准化、通用化浮式风电基础设计及建造，聚酯纤维系泊缆、国产化锚固设备、张紧器等系泊系统关键部件
	动态海缆技术	高压动态缆，环境适配性、半定制化设计
海上风电输送技术	大容量风电机组技术	主轴承、超长叶片轻量化材料国产化，双风机机头研发
	柔性直流输电技术	集群柔直并网，交流升压站和直流换流站一体化设计，换流平台运维技术
融合能种开发技术	波浪能开发技术	波浪能发电规模、效率及稳定性提升
	海上氢能制造、储存及运输技术	高效PEM，电解槽降本，低温液氢系统，验证现有油气管道掺氢运送材料的兼容性与可行性
多能融合技术	海上光伏技术	集约化建造安装技术，耐高湿、高盐光伏材料，漂浮式光伏稳定性
	一体化耦合、动态调节及组网技术	自适应动态调载算法与智能协同控制策略，突破智能微网协同调度技术，“源-网-荷-储”资源动态匹配的协调运行策略

多能融合关键核心技术。重点支持通用化浮式风电基础设计建造及系泊系统、高压动态缆、大容量风机等风电开发技术攻关；同步推进波浪能发电稳定性提升、海水制氢系统降本增效等能种技术突破，攻克远距离柔性直流输电技术，并通过一体化耦合、动态调节及组网技术实现多能融合电网的动态智能调节。

3. 经济性层面——强化产业协同能力，多措并举降低开发成本

构建全产业链协同降本体系，加快制定覆盖设计、制造、施工、运维、并网、安全等全链条标准体系，强化产业协同能力。建议能源央企牵头，联合高校、科研院所和龙头企业组建创新联合体，打造“链长制”产业链，推进海上风电多能融合产业基础固链、技术补链、融合强链和优化塑链，进一步构建自主可控、协同高效的海上风电供应链体系，降低全生命周期成本。优化收敛装备类型，建立大、中、小系列化装备选型图谱，推动设备模块化、施工标准化。鼓励地方对深远海浮式风电实行专属机制电价，将其纳入可再生能源电力消纳责任权重考核，明确绿电、绿氢的优先消纳与价格保障机制。建议各有关部门协同推动对浮式风电、动态缆、海上制氢装置等关键装备制造企业减免税收，优先纳入绿色债券支持目录，通过多措并举提升融合开发的经济可行性。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 4, 2026; **Revised date:** April 12, 2026

Corresponding author: Cheng Bing is a senior engineer from the CNOOC Research Institute Co., Ltd. His major research field is marine resource strategy. E-mail: chengbing@cnooc.com.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Strategic Research on Integrated and Coordinated Development of Offshore Energy” (2025-HZ-30), “Strategic Research on Several Major Issues Concerning the High-Quality Development of China’s Marine Economy” (2025-JJZD-11)

参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要 [EB/OL]. (2026-03-14)[2026-04-09]. <http://lianghui.people.com.cn/2026/n1/2026/0314/c461827-40681761.html>.
Outline of the 15th Five-Year Plan for national economic and social development of the People’s Republic of China [EB/OL]. (2026-03-14)[2026-04-09]. <http://lianghui.people.com.cn/2026/n1/2026/0314/c461827-40681761.html>.
- [2] 政府工作报告 [EB/OL]. (2026-03-13)[2026-04-09]. <http://lianghui.people.com.cn/2026/n1/2026/0313/c461827-40681711.html>.
Report on the work of the government [EB/OL]. (2026-03-13)[2026-04-09]. <http://lianghui.people.com.cn/2026/n1/2026/0313/c461827-40681711.html>.
- [3] 国家能源局关于促进新能源集成融合发展的指导意见 [EB/OL]. (2025-10-31)[2026-04-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202511/content_7048396.htm.
Guiding opinions of the National Energy Administration on promoting the integrated development of new energy [EB/OL]. (2025-10-31)[2026-04-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202511/content_7048396.htm.
- [4] 自然资源部关于探索推进海域立体分层设权工作的通知 [EB/OL]. (2025-10-31)[2026-04-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916283.htm.
Notice of the Ministry of Natural Resources on exploring and pro-

- moting the establishment of layered and three-dimensional rights in sea areas [EB/OL]. (2025-10-31)[2026-04-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916283.htm.
- [5] 光明网. 融通共链成为海上风电产业发展的“加速器” [EB/OL]. (2024-12-17)[2026-01-10]. https://tech.gmw.cn/2024-12/17/content_37741934.htm.
Guangming Online. Integrated collaboration across the industrial chain as an “accelerator” for offshore wind power development [EB/OL]. (2024-12-17)[2026-01-10]. https://tech.gmw.cn/2024-12/17/content_37741934.htm.
- [6] 中国可再生能源学会风能专业委员会, 全球风能理事会. 全球海上风电产业链发展报告 2025 [R]. 北京: 中国可再生能源学会风能专业委员会, 全球风能理事会, 2025.
Chinese Wind Energy Association, Global Wind Energy Council. Global offshore wind supply chain report 2025 [R]. Beijing: Chinese Wind Energy Association, Global Wind Energy Council, 2025.
- [7] 郭胜伟, 门秀杰, 张胜军, 等. 中国海洋能源产业发展现状及协同发展思路 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(3): 230–239.
Guo S W, Men X J, Zhang S J, et al. Development status and synergistic development idea of China’s marine energy industry [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(3): 230–239.
- [8] 申刘飞, 翟雨佳, 吴星微, 等. 海上超导风电制氢一体化研究进展与发展趋势 [J]. 电工技术学报, 2025, 40(11): 3362–3380.
Shen L F, Zhai Y J, Wu X Z, et al. Progress and development trend of integrated research on hydrogen production from offshore superconducting wind power [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(11): 3362–3380.
- [9] 刘欣怡, 吴慕丹, 张楷文, 等. 我国海上风电光伏同场开发建设现状及趋势 [J]. 船舶工程, 2025, 47(6): 167–172.
Liu X Y, Wu M D, Zhang K W, et al. Current status and trends of offshore wind and photovoltaic co-site development and construction in China [J]. Ship Engineering, 2025, 47(6): 167–172.
- [10] 徐璐, 范永春, 郑荣坤, 等. 海上风电与海上光伏融合发展研究进展与未来挑战 [J/OL]. 南方能源建设, 1–12[2026-02-02]. <https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-244>.
Xu L, Fan Y C, Zheng R K, et al. Research progress and future challenges in the integrated development of offshore wind power and offshore photovoltaics [J/OL]. Southern Energy Construction, 1–12[2026-02-02]. <https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-244>.
- [11] 阳杰, 张建华, 马兆荣, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 1–16.
Yang J, Zhang J H, Ma Z R, et al. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind turbine with marine ranch [J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 1–16.
- [12] 王震, 李楠, 潘继平. 油气与新能源融合发展的模式与路径 [J]. 天然气与石油, 2024, 42(1): 1–7.
Wang Z, Li N, Pan J P. Modes and pathway for integrated development of oil & gas and new energy [J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(1): 1–7.
- [13] 李达, 孙涛, 易丛, 等. 深远海浮式风电技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 108–122.
Li D, Sun T, Yi C, et al. Development of deep-sea floating wind power technology [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 108–122.
- [14] 中国可再生能源学会风能专业委员会, 全球风能理事会. 海上风电回顾与展望 2025 [R]. 大连: 中国可再生能源学会风能专业委员会, 全球风能理事会, 2025.
Chinese Wind Energy Association, Global Wind Energy Council. Offshore wind power: Review and outlook 2025 [R]. Dalian: Chinese Wind Energy Association, Global Wind Energy Council, 2025.
- [15] 全球最大漂浮式项目 Hywind Tampen 首台机组完成吊装 [EB/OL]. (2022-05-26)[2026-02-01]. https://www.sohu.com/a/551353603_121123907.
First unit of the world’s largest floating project Hywind Tampen completed hoisting [EB/OL]. (2022-05-26)[2026-02-01]. https://www.sohu.com/a/551353603_121123907.
- [16] Palmer C. Renewable energy seeks boost from floating wind power [J]. Engineering, 2024, 35: 1–3.
- [17] 李丽旻. 浮式海上风电或走进北极圈 [N]. 中国能源报, 2023-05-15 (05).
Li L M. Floating offshore wind power may enter the arctic circle [N]. China Energy News, 2023-05-15 (05).
- [18] 刘小燕, 韩旭亮, 秦梦飞. 漂浮式风电技术现状及中国深远海风电开发前景展望 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(2): 233–242.
Liu X Y, Han X L, Qin M F. Current status of floating wind power technology and prospects for China’s deep sea wind power development [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(2): 233–242.
- [19] 蔡元浪, 张法富, 杨小龙, 等. “海油观澜号”浮式风电平台总体设计及关键技术 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(6): 119–127.
Cai Y L, Zhang F F, Yang X L, et al. General design and key technologies of “CNOOC Guanlan” floating wind turbine platform [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(6): 119–127.
- [20] Lhyfe reviews the results of the Sealhyfe project, the world’s first offshore hydrogen production pilot: Objectives met and progression to an unprecedented level of operational excellence [EB/OL]. (2024-01-26)[2026-02-01]. <https://www.lhyfe.com/press/lhyfe-reviews-the-results-of-the-sealhyfe-project-the-worlds-first-offshore-hydrogen-production-pilot-objectives-met-and-progression-to-an-unprecedented-level-of-operational-excellence/>.
- [21] Deep purple pilot project [EB/OL]. (2024-09-02)[2026-02-01]. <https://www.oceanhywaycluster.no/projectlist/deep-purple>.
- [22] AquaPrimus [EB/OL]. (2026-02-01)[2026-02-01]. <https://aqua-ventus.org/en/projekt/aquaprimus/>.
- [23] Dolphyn hydrogen [EB/OL]. (2019-10-09)[2026-02-01]. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5e4ab9be40f0b677c1344ec8/Phase_1_-ERM-_Dolphyn.pdf.
- [24] 新技术 全球首个海上千万 PEM 槽及制氢系统发布 [EB/OL]. (2025-10-23)[2026-02-01]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2025-10-23/doc-infuwfyp7040561.shtml>.
New technology: The world’s first offshore 1000 Nm³/h PEM electrolyzer and hydrogen production system released [EB/OL]. (2025-10-23)[2026-02-01]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2025-10-23/doc-infuwfyp7040561.shtml>.
- [25] “世界首个”海上风电场内的太阳能发电展现出抵御强风的能力 [EB/OL]. (2025-09-16)[2026-02-01]. <https://geidco.org.cn/>

- 2025/0916/8946.shtml.
 “World’s first” solar power plant within an offshore wind farm demonstrates ability to withstand strong winds [EB/OL]. (2025-09-16)[2026-02-01]. <https://geidco.org.cn/2025/0916/8946.shtml>.
- [26] 荷兰 800 MW 海上风电+5 MW 海上浮式光伏项目同场建设! [EB/OL]. (2024-04-02)[2026-02-01]. <https://news.solarbe.com/202404/02/377214.html>.
 Netherlands 800 MW offshore wind power + 5 MW offshore floating photovoltaic project constructed at the same site! [EB/OL]. (2024-04-02)[2026-02-01]. <https://news.solarbe.com/202404/02/377214.html>.
- [27] 全国首个成规模“风光同场”市场化项目获批, 位于上海奉贤区海域 [EB/OL]. (2025-08-15)[2026-02-01]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_31302974.
 China’s first large-scale “wind-solar co-located” market-oriented project approved, located in the waters of Fengxian District, Shanghai [EB/OL]. (2025-08-15)[2026-02-01]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_31302974.
- [28] 我国首套抗浪型漂浮式光伏平台“黄海一号”完成在位安装 [EB/OL]. (2024-10-16)[2026-02-01]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n13790238/n16406218/c31888215/content.html>.
 China’s first wave-resistant floating photovoltaic platform, the “Yellow Sea No. 1” has completed its in-situ installation. [EB/OL]. (2024-10-16)[2026-02-01]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n13790238/n16406218/c31888215/content.html>.
- [29] 江苏沿海首个离岸型海上漂浮式光伏项目通过航标效能验收 [EB/OL]. (2024-07-16)[2026-02-01]. <https://finance.sina.cn/2024-07-16/detail-inceimac0755512.d.html>.
 Jiangsu coastal area’s first offshore floating photovoltaic project passes navigation mark efficiency acceptance [EB/OL]. (2024-07-16)[2026-02-01]. <https://finance.sina.cn/2024-07-16/detail-inceimac0755512.d.html>.
- [30] SEAWORTHY project by floating power plant receives EU grant for wave-wind offshore platform with hydrogen [EB/OL]. (2023-07-18)[2026-02-01]. <https://energypeople.com/news/story/seaworthy-project-by-floating-power-plant-receives-eu-grant-for-wave-wind-offshore-platform-with-hydrogen>.
- [31] Innovation found [EB/OL]. (2026-01-14)[2026-02-01]. https://ec.europa.eu/assets/cinea/project_fiches/innovation_fund/101133097.pdf.
- [32] 总功率≥10 MW! 漂浮式海上风浪融合发电项目启动招标 [EB/OL]. (2023-07-26)[2026-02-01]. <https://wind.imarine.cn/news/69469.html>.
 Total power ≥10 MW! Tender for floating offshore wind-wave integrated power generation project launched [EB/OL]. (2023-07-26)[2026-02-01]. <https://wind.imarine.cn/news/69469.html>.
- [33] Buck B H, Krause G, Pogoda B, et al. The German case study: Pioneer projects of aquaculture-wind farm multi-uses [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 253–354.
- [34] World’s first commercial Seaweed Farm within a wind farm [EB/OL]. (2024-08-22)[2026-02-01]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/worlds-first-commercial-seaweed-farm-within-a-wind-farm-302227715.html>.
- [35] The future of floating. now [EB/OL]. (2026-02-01)[2026-02-01]. <https://enerocean.com/w2power/>.
- [36] 国内首个风渔融合养殖平台“伏羲一号”入级中国船级社 [J]. 中国船检, 2025 (2): 9.
 Fuxi No. 1, the first wind-fishing integrated farming platform in China, was classified into China Classification Society [J]. China Ship Survey, 2025 (2): 9.
- [37] 林旻, 田会元, 孙秋菊, 等. 国内外风渔融合模式现状、挑战及我国发展趋势展望 [J]. 海洋渔业, 2025, 47(5): 690–702.
 Lin M, Tian H Y, Sun Q J, et al. Current status and challenges of wind-fishery integration models at home and abroad, and outlook on China’s development trends [J]. Marine Fisheries, 2025, 47(5): 690–702.
- [38] 李沁, 郭威, 汪璇. 基于浮式风机的海洋清洁能源融合发展 [J]. 中国海洋平台, 2024, 39(4): 32–38.
 Li Q, Guo W, Wang X. Integrated development of marine clean energy based on floating wind turbines [J]. China Offshore Platform, 2024, 39(4): 32–38.
- [39] 全球首个能源岛初具雏形! [EB/OL]. (2017-06-02)[2026-02-01]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2025-10-20/doc-infupqvr9980562.shtml froms=ggmp>.
 The world’s first energy island takes shape! [EB/OL]. (2017-06-02)[2026-02-01]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2025-10-20/doc-infupqvr9980562.shtml froms=ggmp>.
- [40] Meet VindØ—The world’s first energy island [EB/OL]. (2021-01-15)[2026-02-01]. <https://www.offshorewind.biz/2021/01/15/meet-vindo-the-worlds-first-energy-island/>.