

[海上能源岛]

以海上风电为依托建设海上能源岛的技术及经济分析

文/刘恒
中海石油（中国）有限公司

在应对全球气候变化与实现可持续发展目标背景下，低碳能源的开发和利用显得尤为重要。围绕以海上风电为基础建设海上能源岛展开详细分析，对海上风电及海上能源岛的基本概念进行阐述，分析二者关系与协同效应，深入探讨建设海上能源岛的主要技术要点，包括风电场布局设计、基础设施建设及能量转换与存储技术，从经济角度出发，评估建设海上能源岛的成本、收益及市场前景。

在全球面临气候变化、环境恶化和能源危机背景下，寻找可再生能源的解决方案已成为各国政府和企业的共同目标。海上能源岛不仅是对海上风电资源的深度开发，也是对未来能源形态的全新探索。深入分析以海上风电为依托建设海上能源岛的技术及经济可行性，具有重要的理论和实践意义。

海上风电与海上能源岛的关联分析

1. 海上风电概述

海上风能是一种可再生能源，利用位于水体（通常是海洋或大型湖泊）中的风能来发电，由于海上风力模式更一致，通常比陆上风力发电更有效，导致更高的容量和能源输出。根据国际可再生能源机构（IRENA）数据，2022年全球海上风电装机容量达到5 000万kW，较前几年有显著增长。到2030年，由于涡轮机技术进步、成本的降低和可再生能源基础设施投资的增加，预计将扩大到234亿kW。引领海上风能发展主要地区包括欧洲、美国和中国，此地区政府支持性政策和有利的自然条件正在为广泛部署铺平道路。加强对海上风能关注，不仅旨在满足不断增长的能源需求，而且在减少碳排放和减缓气候变化方面也发挥着关键作用^[1]。

2. 海上能源岛的定义与功能

海上能源岛通常被定义为在海洋环境中建造自给自足的能源供应平台，旨在利用各种可再生能源，特别是海上风能。此岛屿具有多种功能，包括储存产生风能，向附近沿海地区分配电力，能源转换（如将风能转化为氢或其他可用形式），以及海洋资源的开发，包括潜在的水产养殖和旅游机会。海上能源岛屿作为能源管理关键枢纽，可使能源系统有效集成、能源存储解决方案优化和促进电网的稳定。

3. 海上风电与海上能源岛的协同效应

海上风能和海上能源岛屿之间协同关系是现代可再生能源系统引人注目的方面，海上风力发电产生大量能源。例如，一台8 MW海上风力涡轮机每年可产生约3.8万MW·h的电力，足以为约1万户家庭提供电力。该持续能源输入被输送到海上能源岛屿，作为能源储存和分配的集中枢纽。此岛屿采用先进能源管理系统来优化风能的使用，通过有效能源存储解决方案，如电池或制氢系统，可提高高达20%的整体效率。该整合使能源岛能够动态响应风能发电波动，确保电网稳定电力输出，并减少对化石燃料的依赖。该联合系统不仅提高能源供应可靠

性和弹性，而且显著减少温室气体排放。

海上能源岛建设总体思路

依托海上风电打造涵盖海上风电、海上风电制氢、海洋牧场、海水淡化、电力枢纽和岛上储能等多种功能融合的海洋综合立体用海示范，创建海岛联动、陆岛协同和海陆互补的发展格局。

1. 风电场布局设计

海上风电场的布局设计对于提升风能的利用效率至关重要。在设计阶段，需进行详细的风速和风向分析。通常风速数据需通过多年的气象观测得出，以确保所选位置具备年均风速不低于6 m/s的条件。布局设计时应避免风力涡轮机之间的涡流干扰，通常建议涡轮机之间的间距保持在3~5个直径的距离。此外，考虑到海洋环境的复杂性，需进行海底地形勘探和水深分析，确保设备的稳定性。2019年，中国的海上风电场布局形成良好的示范，其风电场的平均发电效率已达到40%以上。

2. 能量转换与存储技术

海上能源岛面临的主要挑战是风能发电的间歇性与不稳定性，这就需要高效的能量转换与存储技术来平衡供需。典型的能量转换技术包括使用具有高转化效率的风力涡轮机。这些涡轮机近年来效率提升已超过48%。在存储技术方面，锂离子电池和钠硫电池等储能系统日益受到青睐，能为风电场提供数小时至数天的电力备份。在2022年的应用案例中，一些海上风电项目已经实现20 MW·h的电池储能容量储备，确保即便在风力不足的情况下，能源岛仍能持续向电网输送电力。

3. 海上能源岛的海水淡化

海水淡化的主流技术有多级闪蒸、低温多效等热法和反渗透技术等膜法。淡化水虽然水质指标优于我国生活饮用水标准，但是价格比自来水高1~3元/t。可通过将海水淡化与新能源发电、化工等产业相结合，利用副产品收益，实现海水淡化成本有效降低。

本文推荐“海水淡化+海上风电制氢”示范，先将海水进行淡化，淡化的海水利用海上风电制取氢气，主要有四种开发模式。一是风电平台+海水淡化+电解设备。该模式属于分散式制氢，适用于新建海上风电场，通过在风机平台上设置水电解制

氢设备实现大规模的分散式制氢。二是海上风电+新建海上平台+海水淡化+电解设备。该模式属于集中制氢，适用于离岸较远的风电场以及分散式制氢不经济的风电场。三是海上风电+旧平台改装+海水淡化+电解设备。海上风电制氢就近利用即将退役的油气平台改造为制氢平台，并利用现有的油气管道输送氢气，从而降低成本。四是海上风电+海水淡化+陆上电解。适用于近岸海上风电场。

4. 海上能源岛的多功能集成

海上能源岛的设计不仅限于电力生产，还能够实现多种功能集成，以增强其经济效益。例如，通过海水淡化技术，能源岛每天可处理超过1 000 m³的海水，转化为可饮用的淡水，满足周边沿海居民的用水需求。此外，海水养殖可通过养殖网箱技术，在平台周边实现年产数十吨的海产品，进一步推动地方经济发展。制氢技术的集成使得能源岛将余电转化为氢气，拓宽能量利用的领域。预计在未来五年内，部分项目将实现氢气年产量达1 000 t，从而推动绿色氢经济的发展。

以海上风电为依托建设海上能源岛的技术要点

1. 风电场布局与设计

海上风电场布置和设计是直接影响发电效率和总发电量的关键技术要素，风力涡轮机的最佳位置是由风速数据、洋流和海床特性决定。例如，在北海角Rev 3项目中，战略涡轮机放置的设计是为最小化尾流效应和优化风捕获，潜在地提高发电效率高达15%。广泛的模拟模型表明，与配置不佳农场相比，适当设计的布局导致年发电量增加10%~20%。

汽轮机之间距离标准建议间距为转子直径6~10倍，考虑到典型转子直径为150 m，这意味着涡轮机之间的间距为900~1 500 m。该间距减少湍流，促进更好能量捕获，从而导致更高的整体输出。来自各种研究经验数据强调，加强间距做法对能力因素和经济可行性都有显著贡献。详情见表1。

通过先进的模拟技术，海上能源开发商优化风电场设计，从而显著提高海上能源系统效率和可持续性。

表1 影响风电场布置的因素

名称	数据值
优化的涡轮机间距	其间距是其直径的6~10倍
涡轮直径示例/m	150
间距距离（最小）/m	900~1 500
最大发电能力（每台涡轮机）/MW	240
预期发电效率的提高（%）	15
精心设计农场的典型容量系数（%）	45~55
年平均能源产量（对于240 MW的农场） /（MW·h）	1 000 000

2. 能源岛的基础设施建设

海上能源岛屿建设需要精心规划，是成功整合可再生能源的基础。主要基础设施包括服务船舶、储能系统和能源管理系统（EMS）的泊位，每个泊位都在能源岛运营效率中发挥着一定程度的作用。泊位能够有效确保维护和操作团队迅速访问风力涡轮机，设计良好泊位同时容纳多艘服务船，减少周转时间，提高维修效率。例如，根据位置和环境条件，建造典型泊位的成本约为1 000万~1 500万元。

能源储存系统对于管理风能间歇性性质至关重要，储氢技术因其高能量密度和灵活性而成为一种领先的技术。例如，项目储氢气设施，总容量为100 MW·h，需要大约5 000万元的投资。该系统有效地存储在风力高峰期产生的多余能量，在需求高时将此能量转换为能源，显著减少能源损失，提高电网的整体稳定性。除存储之外，高效能源管理系统（EMS）对于监测能源的产生、消耗和存储也存在着不可替代的作用，实施先进EMS系统可使运营成本降低约15%~20%，通过实时数据分析的集成，该系统预测能源生产和需求，优化运营决策，提高可靠性^[2]。详情见表2。

表2 海上能源岛基础设施的估算成本

名称	数据值
服务泊位建设的估算成本/万元	1 000~1 500
储氢系统估算成本（100 MW·h容量）/万元	5 000
能源管理系统（EMS）预计节约成本（%）	运营成本降低 15~20
每艘船的平均维护费用（元/年）	500 000
预期维护频率（每台涡轮机）	每6个月

通过考虑到此关键基础设施组成部分，开发商增强海上能源岛屿的弹性和功能，确保可再生能源可靠供应，同时最大限度地提高经济回报。随着技术和工艺不断发展，对此类基础设施的投资很可能

会为能源生产者和消费者带来显著的长期利益。

3. 能量转换与存储技术

能源转换技术是海上能源岛屿高效运行关键支柱，该技术专注于将海上风力发电与氢气储能解决方案集成。通过利用风能通过水电解产生氢气，当需求超过发电能力时，就储存和利用能源，为可再生能源间歇性挑战提供实用的解决方案。目前氢电解技术已经达到70%~80%的效率，最先进的电解槽现在达到约75%的平均效率。该高效率意味着每使用1 kW·h电力，大约产生0.75 kW·h的可用氢能。氢气拥有约33.6 kW·h/kg能量密度，使其成为当今能量密集的存储介质之一。

从经济角度来看，通过电解生产氢气成本约为1.50元/kg。近年来由于技术进步和生产设施的规模经济，这个成本稳步下降。该成本效益使氢气在向绿色经济转型过程中都成为一种有竞争力的储存替代品。详情见表3。

表3 氢能储存技术参数

名称	数据值
电解效率（%）	75
储氢成本/（元/kg）	1.50
储氢能量密度/（kW·h/kg）	33.6
氢气的生产成本/（元/kW·h）	4.00~6.00
电解器的预期使用寿命/h	10 000

考虑到潜在政府激励措施、碳定价以及对清洁能源解决方案日益增长的市场需求，氢能源储存的经济可行性得到进一步提高。随着海上风力发电场容量和规模增加，海上能源岛屿内储氢系统集成将变得越来越有吸引力，为未来可持续能源铺平道路。该双重方法不仅能够实现高效能源转换和存储，而且还将近海能源岛屿定位为脱碳能源领域的关键角色。

以海上风电为依托建设海上能源岛的经济分析

1. 建设成本分析

海上能源岛屿建设需要在多个领域进行大量的金融投资，包括基础设施、设备采购和安装，此成本受到海上项目复杂性和规模的显著影响。根据目前市场数据，海上风能资产平均建设成本估计约为4 200元/kW。鉴于需要建立健全的基础设施和先进

技术解决方案，典型海上能源岛项目的总投资预计将达到约10亿元。

在施工开始前，场地准备包括地质调查和环境评估。根据地点和条件，每个项目的费用从5万元到15万元不等。由于大多数海上建筑只能通过专门的船只进入，物流和运输成本额外增加总体建设预算10%~15%。对于10亿元项目来说，意味着增加1亿~1.5亿元，显著影响该项目的总融资需求。

2. 运营成本与收益预测

海上能源岛运营成本主要包括运营和管理费用、维护、保险和监测系统，典型海上能源岛的年运营成本约为2 000万元。包括风力涡轮机日常维护、员工工资、定期检查和更换部件，以确保最佳的性能和可靠性。根据现行电价趋势和预计的市场增长，海上风电场产生能源的年收益预计将达到4 000万元左右。这一预测是基于每MW·h约100元电价和估计每年40万MW·h的发电量。

由于能源价格波动、恶劣天气事件导致维护需求以及潜在的监管变化，可能会发生运营成本的变化。如果能源价格上涨到120元/(MW·h)，预计年收益将上升到4 800万元，净收入将提高到2 800万元。政府以可再生能源信贷或补贴形式提供的支持进一步提高盈利能力。在许多地区，根据现有的政策，此措施为年收入增加500万~1 500万元。随着技术进步和海上风电场产能的增加，运营效率会提高，在项目使用寿命内将平均成本降低10%~15%。虽然海上能源岛屿运营成本显著，但可观的年收入和净收入表明良好的财务前景，对运营费用仔细管理，以及通过市场和政策变化而增加收入的潜力，对项目的整体经济可行性有重大贡献^[3]。

3. 市场需求与竞争分析

随着各国实施雄心勃勃“碳中和”目标，并加速对可再生能源的投资，对海上风能需求预计将稳步增长。根据沃顿研究所数据，到2030年，全球海上风能市场预计将达到4 900亿元，复合年增长率(CAGR)约为20%。人们对气候变化认识提高，再加上涡轮机技术进步和海上风力发电生产成本的降低，正在推动这一增长。

该市场扩张很可能会吸引更多公司进入海上风能行业，从而导致竞争加剧。随着更大的参与者和

新竞争者争夺市场份额，竞争格局将会演变，影响定价、技术进步和运营效率。

不断提高涡轮机效率 and 设计，有望降低能源水平成本(LCOE)，使海上风电项目更具吸引力。例如，浮动风力涡轮机技术允许安装在更深的水域，扩大可行的地点。政府激励措施和有利的监管框架将进一步提高需求，丹麦、英国和德国等国家正在大幅提高海上风力发电能力，凸显其向可再生能源的积极转变。据估计，到2025年，对海上风力基础设施投资每年可能超过200亿元，推动相关技术和服务的供应和需求。虽然亚洲市场，特别是中国市场，有望通过江苏海上风电场等主要项目实现快速增长，但欧洲市场仍具有领先的成熟企业的竞争力。在北美，能够创新和适应快速变化市场环境的公司将处于有利地位^[4]。

结束语

综上所述，依托海上风电开发海上能源岛，不仅能够有效整合和利用丰富的海洋风能资源，而且还具备实现多种能源形式协同发展的潜力。通过先进技术手段和合理的设计布局，海上能源岛能够显著提升能源生产和使用效率，同时降低运营成本。随着全球对可再生能源需求持续增长，这一新兴产业展现出广阔的市场前景和经济效益。EA

(收稿日期：2024-09-27)

参考文献

- [1] 尹积军，吴文传．浙江构建新型电力系统的技术路径与实践[J]．中国电机工程学报，2023，43(14)：5404-5414．
- [2] 田杰．远海风电送出技术与应用[J]．供用电，2022，39(11)：1-1．
- [3] 胡鹏，曹柏寒，何曦，等．海洋油气和新能源融合发展路径及建议[J]．油气与新能源，2023，35(5)：53-58．
- [4] 李朝霞．御海驾风 档案记载海上风电创业之路——访国电电力浙江舟山海上风电开发有限公司执行董事，党委书记徐勇[J]．四川档案，2022(1)：32-34．