

•海洋资源可持续开发与利用•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400858



本刊网刊

海上漂浮式光伏平台研究进展与关键技术

王 霄¹, 王树青^{1,2*}, 宋宪仓^{1,2}, 王浩歌¹, 汪艳茹¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266404; 2. 中国海洋大学 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:全球能源需求不断增加,传统化石能源储量有限且燃烧排放会造成气候污染,发展可再生能源成为必然趋势。在过去的十年内,漂浮式光伏系统由于其更高的能源产量和发电效率得到迅猛发展。凭借更广阔的应用范围和更优质的太阳能资源,海上漂浮式光伏展现出巨大的发展潜力。首先,简要回顾海上漂浮式光伏的发展现状,总结全球典型的海上漂浮式光伏平台结构形式,分析在复杂海洋环境下海上漂浮式光伏开发面临的挑战;然后,从模块化阵列耦合动力响应分析方法、柔性连接器与系泊系统设计、非均匀波浪场模拟,以及海上漂浮式光伏施工安装技术和运维监测技术等方面,论述海上漂浮式光伏平台相关技术问题;最后,对海上漂浮式光伏系统未来向深远海推进、降本增效、协同开发与融合技术等研究方向和发展策略进行探讨。本研究旨在为未来海上漂浮式光伏平台设计和工程实践提供指导和参考。

关键词:漂浮式光伏系统;发展现状;关键技术;未来发展趋势

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)01-0289-14

随着全球经济的不断发展,人类对能源需求不断增长,但传统化石能源有限且污染问题加剧,可再生能源的开发十分迫切。太阳能作为一种重要的可再生能源,具备无污染、资源丰富和可持续利用等优势,且技术进步和成本下降也使太阳能光伏发电得到了快速推广。根据国际能源署的数据,2023 年全球新增光伏装机容量达 347 GW^[1],中国、美国、印度和欧洲的太阳能发电市场份额显著提升。

随着陆上光伏的发展,土地资源的限制和政策障碍逐渐显现,水上光伏应运而生。水上光伏主要部署在湖泊、水库等水域,具备节约土地、发电效率高等优点,但也面临影响行洪和航运等问题^[2]。相比之下,海上光伏凭借其更广阔的应用范围和更优质的太阳能资源,展现出更大的开发潜力。与海上桩基式光伏不同,漂浮式光伏(FPV)可部署于水深大于 5 m 的水域,拓展了可利用的海域资源,具有更大的开发潜力。

海上 FPV 平台不仅充分利用海洋空间和优质的太阳能资源,还通过海水冷却提升光伏发电效率。靠

近沿海的电力负荷中心有助于降低输电成本,并与其他海洋可再生能源如风能、波浪能的结合,促进能源的综合利用,提升经济效益^[3]。海上 FPV 平台的开发不仅有助于减少对陆地资源的依赖,还能推动绿色能源的多元化发展,符合全球能源转型和碳中和的目标。作为一种新兴的新能源产业,海上光伏的开发目前处于科研及示范验证阶段,缺乏结构设计标准和相关规范。尽管海上 FPV 平台具备诸多开发优势,但恶劣的海洋环境对海上 FPV 平台的结构设计和工程实践提出了更高的要求,其发电成本也明显高于陆上光伏。海上 FPV 平台通常由多浮体模块通过连接构件组成阵列,并依靠系泊和锚固系统固定于海底。在复杂的海洋环境中平台结构安全性受到单体强度、连接器设计及系泊系统布置等多重因素的影响。

1 海上 FPV 平台研究现状

早期 FPV 项目主要集中在淡水水域,2011 年法国公司 Ciel et Terre 推出了商业化 FPV 系统 Hydrelia^[4],

收稿日期:2024-10-23 修回日期:2024-12-12 网络出版日期:2025-01-03

基金项目:国家自然科学基金基础科学中心项目(52088102)

作者简介:王 霄(1997—),女,博士生。研究方向:海洋浮式结构动力耦合。E-mail:wx2919@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者:王树青,教授,E-mail:shuqing@ouc.edu.cn

采用聚乙烯浮筒和模块化支撑架。如今全球范围内已经有海上 FPV 相关成功案例,全球 60 多个国家正在积极推进 FPV 发展,超过 35 个国家和地区拥有超过 350 个 FPV 电站^[5]。

1.1 海上 FPV 结构组成

海上 FPV 平台一般由浮力结构、支撑结构、系泊与锚固系统、连接构件、光伏组件、电缆与逆变器等模块组成。

1.1.1 浮力结构

浮力结构为海上 FPV 平台提供必要的浮力和稳定性,常用材料包括高密度聚乙烯(HDPE)、聚丙烯(PP)、铝合金、不锈钢和复合材料。浮筒可采用塑料或金属单一材料,或塑料外壳与金属骨架的混合结构。塑料浮筒轻便耐腐蚀,但强度较低,常通过填充泡沫增强抗冲击力;金属浮筒则强度高、抗风浪,但成本较高且耐腐蚀性较差;混合浮筒结合了两者的优点,但制造过程复杂且成本高。浮力结构设计需要在材料选择、制造成本与抗腐蚀能力之间平衡,以确保平台的安全与稳定性。

1.1.2 支撑结构

支撑结构连接浮力结构和光伏组件,确保组件稳固并维持最佳倾角,提高发电效率。材料一般为钢材、铝合金和其他复合材料^[6]。根据框架形式,支撑结构可分为刚性框架和柔性薄膜结构。刚性框架具有高强度和抗风浪性能,但较重、成本高且易腐蚀;柔性薄膜结构轻便易安装,能随波浪浮动并抵抗冲击,但耐久性较差,平台易积水沉底。不同环境下需要选择合适的支撑结构,以确保光伏平台长期稳定运行。

1.1.3 系泊与锚固系统

系泊与锚固系统用于固定海上 FPV 平台,限制其漂移并吸收环境冲击。常见锚固方式包括重力锚、桩锚、吸力锚和拖曳锚,锚固方式的选择取决于水深、土质和平台要求。重力锚主要由混凝土支撑,适用于浅水,成本低但效率也低;桩锚适应多种土壤,可有效抵抗水平和垂直荷载,但在深水中应用较少;吸力锚能适应不同水深和土质,安装快但难以应用于致密砂土;拖曳锚易于安装和拆卸,适合船舶和临时系泊,但不抗上拔力。系泊系统一般选用锚链、钢丝绳、合成纤维绳,其组合形式主要分为悬链式、张紧式和顺应式 3 种。悬链式系泊通过锚链自重为平台提供约束;张紧式系泊利用预张力和系泊材料本身的弹性为平台提供水平刚度;顺应式系泊在悬链式系泊基础上增加了配重和浮子,通过调整系泊形态改变系泊系统对平台的约束力。对于浅水大潮差海域,还可应用水平系泊方案,避免水位变化引起系泊力急剧变化,导致结构

安全性受到威胁。

1.1.4 连接构件

海上 FPV 平台通常采用模块化设计,连接构件负责模块之间的拼接,保持整体稳定性和灵活性。连接构件分为刚性和柔性两类:刚性构件如螺栓和钢杆能够牢固连接模块,但缺乏灵活性,在大尺寸结构中易受冲击损坏;柔性构件如铰链和橡胶连接^[7],能够缓冲波浪冲击并维持结构灵活性,但强度较低,需定期检查和更换。模块化设计能简化安装和维护,但连接的强度和灵活性需要根据具体环境加以平衡,以确保系统长期稳定运行。

1.1.5 光伏组件

光伏组件用于将太阳能转化为电能。常见光伏组件分为晶硅光伏板和薄膜光伏板^[8]两种。晶硅光伏板耐用高效,但成本较高;薄膜光伏板重量轻、适应性强,但转换效率较低^[9]。

1.1.6 电缆与逆变器

FPV 系统中的电缆将光伏板产生的直流电传输至逆变器,并监控和控制系统^[10]。逆变器将直流电转为交流电,调节电压和频率,确保稳定输出,并具备监控功能^[11]。

1.2 海上 FPV 结构形式及发展现状

根据目前海上 FPV 结构设计概念和案例,可以将海上 FPV 结构形式总结为高密度聚乙烯浮体式、柔性薄膜式、金属框架式和半潜式几种典型形式,如表 1 所示。

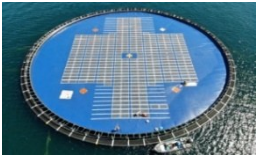
高密度聚乙烯浮体式光伏结构通常由 HDPE 浮筒和光伏组件支架组成。结构简单、模块化设计,易于运输和安装,生产和维护成本相对较低,材料具有较强的耐腐蚀性。但浮体结构易受到风浪影响,稳定性较差,一般适合较为平静的水库或河道水域。

柔性薄膜式一般将轻质薄膜光伏组件直接附着在柔性薄膜上,薄膜通过阻尼线连接浮力结构。薄膜通常采用耐腐蚀的高分子材料。结构整体重量轻,对复杂的水面形态适应性强,因此,结构平坦风阻小、稳定性高。但薄膜光伏组件的效率通常低于晶硅光伏组件,且柔性薄膜材料易受到海水和紫外线影响而老化。挪威公司 Ocean Sun 采用的是柔性薄膜式浮体技术^[12],该技术通过膜的水弹性和阻尼特性减少波浪影响,并利用水的降温效果提高发电效率。目前,该系统在阿尔巴尼亚、菲律宾和中国山东成功安装了多个示范项目。

金属框架式由钢制框架作为主要支撑结构,将光伏组件安装在框架上方,将浮力结构固定在框架下侧。金属结构自重和刚度较大,能够承受较大的荷载和外力,且可以设计成大跨度或多层结构,适合大规模光伏电站建设。然而,金属结构在海洋环境中易受

表1 海上FPV结构形式

Tab. 1 Offshore floating photovoltaic structure types

类型	示意图	结构形式	优势	不足
高密度聚乙烯浮体式		由 HDPE 浮筒连接形成阵列,光伏组件安装在浮筒上,浮筒为整个平台提供浮力	耐腐蚀性强、成本较低、安装方便	稳定性差、寿命有限
柔性薄膜式 ^[12]		由水弹性柔性薄膜、浮力结构及阻尼线等组成,无复杂连接件	轻量化、柔性安装、低风阻	发电效率较低、耐用性差
金属框架式 ^[13]		由金属框架作为主要支撑结构,光伏组件安装在框架结构上,浮筒或其他浮力结构固定在框架上	强度高、稳定性好、适应性强	耐腐蚀性差、高成本、运输和安装复杂
半潜式 ^[14]		类似于海洋平台结构,采用半潜式结构形式,通过立柱支撑,结构相对简单	抗风浪能力强、稳定性高、使用寿命长	成本高、维护复杂、运输安装难度大

到腐蚀,需额外做防腐处理,结构的运输和安装过程复杂,制造、安装和维护成本较高。奥地利公司Swim-sol开发了名为Solar Sea的海上FPV系统^[13],采用铝材框架和泡沫浮体,单模块装机容量24 kW,可承受1.5~2.0 m浪高和12级台风^[12]。

半潜式结构类似于海洋平台,部分浮于水面,通过水下配重维持整体稳定性。由于部分结构浸入水下,可提高结构稳定性,因此,平台具有较好的抗风浪能力,适用于开放海域。结构设计坚固,能够在海洋环境中长期使用。但由于结构复杂,设计、制造和安装成本较高,运输、安装难度大。并且需要定期对水下部分进行检查和维护,维护难度和成本较高。荷兰Solar-Duck公司设计了类似半潜式油气平台的三角形漂浮光伏平台^[14],单个模块设计容量约为16 kW,4个三角形模块可拼接成1个大三角形平台,平台浮出水面3 m,2021年其示范项目在荷兰港口投入使用。

Moss Maritime和Sinn Power等公司也提出了各自的海上漂浮光伏解决方案,目前大多处于示范阶段,海上FPV结构案例如图1所示。

中国海上FPV案例如图2所示。由中国中林集团和中集来福士集团合作研发的“集林一号”^[16]是全球首个竹基复合材料海上FPV平台,并在烟台进行了实证测试(图2(a))。该平台材料是以竹子为基材、采用多种新工艺制成的新型生物基材料。与传统钢结构相比,竹基复合材料具有重量轻、成本低、耐海水腐蚀、

使用寿命长、绿色环保等优势。此外,华能集团自主设计建造的“黄海一号”于2024年在山东半岛南部黄海海域开展实证测试^[17]。该平台为六边形设计和桁架式结构,重量超360 t,边长超25 m,最高可抗10 m的海浪(图2(b))。

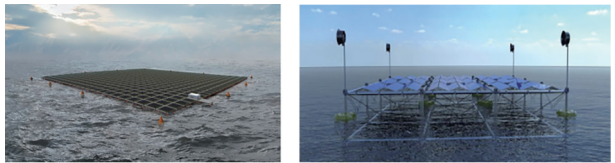


图1 海上FPV结构案例
Fig. 1 Cases of offshore floating photovoltaic structures



图2 中国海上FPV案例
Fig. 2 Cases of offshore floating photovoltaic structures in China

2 海上FPV平台开发挑战

2.1 复杂的海洋环境挑战

海上桩基式光伏平台固定于海床,其桩基承受持续的波浪冲击和潮汐变化,强风则对光伏组件及支撑结构造成较大影响。相比之下,FPV平台稳定性受风、

浪、流、冰、潮汐等环境要素影响更大,易发生漂移,阵列挤压、连接件断裂等风险更高,光伏阵列破坏现象如图3所示。台风带来的强风和暴雨可能严重破坏平台,暴雨会增加平台重量,可能导致电气系统损坏。持续的海浪冲击会影响光伏组件的稳定性,甚至造成结构疲劳。海流也会推移平台,增加其漂移风险,海冰在寒冷区域则可能直接损坏浮体和支撑结构。潮汐变化还会影响系泊系统的性能,进而影响平台的稳定性^[18]。



图3 光伏阵列破坏现象

Fig. 3 Destruction phenomena of photovoltaic arrays

此外,海上FPV平台长期暴露于海水中,金属部件容易受到盐雾和海洋生物的腐蚀,尤其是海底电缆和支架。高温高湿的海洋环境会加速光伏组件的降解,降低发电效率^[8]。光伏组件的封装材料可能发生脱层,导致水分进入组件内部,进而引发化学反应,形成气泡和银氧化物,进一步影响发电性能并缩短组件寿命。此外,腐蚀带来的蜗牛纹和热斑现象也增加了设备维护的复杂性^[19]。

2.2 生物附着和污垢积累风险

生物附着和热点现象如图4所示。海洋环境容易滋生生物污垢,这些附着物会增加光伏平台的负载并影响光伏组件的效率(图4(a))。海洋生物可能附着在水下结构和电缆上,增加系统的重量和故障风险。防污涂层技术是目前解决海洋生物污染问题的主要方法^[20]。根据防污机制不同,防污涂层材料可分为生物活性防污、自抛光防污、表面润湿防污、光催化杀菌和仿生防污等^[21]几种。

光伏组件也会受到鸟粪或生物污垢的影响,产生局部阴影并导致热斑(图4(b)),最终可能损坏组件。

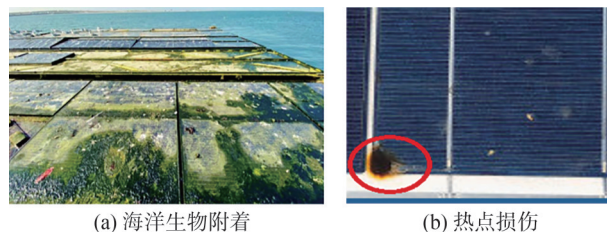


图4 生物附着和热点现象

Fig. 4 Biofouling and hotspot phenomena

2.3 海上FPV对环境与生态的干扰

FPV平台可能对海洋生态系统造成影响。安装过

程可能扰动海底生物和沉积物,长期运行会改变海底生态平衡^[22]。大面积光伏板遮挡光照,影响水下植物的生长和光合作用^[23]。光伏结构的长期存在还可能改变海水流动模式,影响水体自净能力。此外,材料的降解可能释放微塑料和金属污染物,进一步影响海洋生态环境^[24]。NATURSEA-PV公司^[25]采用轻量化、灵活的生态超高性能混凝土环保材料,并结合耐腐蚀和防污涂层技术,以提高结构可靠性和寿命;同时在设计上采用开口结构,确保光照到达水体,减小对水下生态系统的影响。

2.4 高昂的综合成本

由于结构、材料、安装和运维工作更加复杂,目前海上光伏的投资和运营成本远高于陆上光伏系统。水上光伏板成本比陆地高10%~15%,海上光伏板则会更加昂贵^[26]。同时,漂浮式光伏平台安装需要专业的海上施工设备和技术,FPV平台结构需要更坚固的材料和设计方案,其锚泊系统设计和制造也会增加成本。海上电气操作安全要求高于传统光伏项目,海上光伏服役期间的桩基础、漂浮结构和锚固系统及光伏组件的维护更加复杂。

2.5 航道冲突与海洋空间竞争

海上漂浮式光伏平台可能占据航道空间,特别是在交通繁忙的沿海区域^[27]。平台漂移可能引发航运事故,增加航运安全风险。此外,漂浮平台与其他海洋资源开发项目(如风电场和养殖区)存在空间竞争,这些冲突可能影响海洋资源的合理利用。

3 海上FPV平台关键技术问题

不同于海上油气和风电平台,海上FPV平台平面尺寸通常达几百米甚至上千米,通常由多个浮体通过连接构件组成阵列,并依靠系泊和锚固系统固定于海底。这种平台的结构安全性受到单体强度、连接器设计及系泊系统布置等多重因素的影响。海上FPV平台目前多部署在近岸浅水海域,海底地形变化导致水深不均匀,要求系泊系统采取非对称设计。此外,浅水区域的潮位变化,即使幅度较小,也会造成水位的显著波动,进而导致系泊系统张力剧变。浅水效应和海底地形变化还会使波浪产生变形,导致非均匀波浪场,对平台的水动力性能、连接与系泊安全性提出了更高的技术要求。这些外在环境因素需要深入研究,以确保平台在复杂海况下的稳定性和安全性。

3.1 阵列耦合动力响应分析方法

海上FPV阵列的动力响应分析主要受风、浪、流等海洋环境影响,不同于单体结构,在阵列中模块间通过柔性元件(如缆绳或铰链)连接。由于模块间距较

小,水动力干扰效应显著,各模块的运动响应复杂。此外,当单体数量达到数十甚至几百时,阵列耦合计算效率大大降低。优化水动力分析和耦合计算方法,以提高阵列耦合动力计算效率、保证计算精度,是海上FPV阵列的动力响应分析要解决的关键问题。

阵列的水动力分析方法分为线性和非线性两类。线性方法基于势流理论,假设流体无黏无旋,适用于模块间距较小的情况,通过频域和时域分析计算附加质量、辐射阻尼和响应幅值算子(RAO)。当浮体运动较大时,线性方法精度下降,引入瞬态湿表面划分的弱非线性方法以提高精度^[28]。而对于波浪与浮体间黏性效应较强的问题,无黏无旋假设显然不合理,此时引入非线性水动力分析方法。非线性方法依托计算流体力学(CFD),能够模拟复杂流动,包含欧拉法和拉格朗日法。欧拉法使用网格法处理流体域,被广泛应用于结构水动力学^[29-30];拉格朗日法通过粒子离散法处理流体,适合复杂流动的模拟^[31-32]。

阵列多体与波浪耦合计算方法一般分为直接法和矩阵法。直接法通过将所有单体视为振荡势流解的边值问题的一部分以求解相互作用问题,包括刚性模块-柔性连接器方法(RMFC),以及网络建模方法。RMFC方法将各模块视为刚体,柔性特性主要体现在连接器上,被广泛应用于多体水动力分析,研究发现连接器类型和参数对系统性能影响显著^[33]。相关研究包括对不同连接器设计及其刚度优化的数值分析^[34-36],表明不同海况下连接器设计对系统性能至关重要。网络建模方法通过定义结构拓扑矩阵和连接面建立拓扑矩阵,适用于任何类型的连接构型^[37],此方法已被成功应用于多模块串联平台的研究,并通过物理实验验证了其有效性^[38]。然而,随着单体个数增加,其求解效率大大降低。矩阵法通过代数关系引入每个单体的衍射传递矩阵和力传递矩阵来求解多体之间的相互作用问题,可以提高求解效率,但需要预先构建耦合矩阵,且对浮体之间的相互作用模型要求较高^[39-40]。

3.2 柔性连接器设计方法

海上模块化阵列中模块间通过刚性或柔性连接构件进行连接,模块间的相对运动响应和力的传递直接影响到连接构件的使用安全性,进而影响到整体结构安全性。刚性连接器可以有效约束相邻模块之间的相对运动,从而引起较大的连接器负载;柔性连接器允许一些相对运动,可一定程度上降低连接器负载^[41],在阵列多体系统中更常见。相比于其他通过连接组成系统的海上平台(如浮式防波堤等),海上FPV平台的模块化、阵列化程度更高,连接器受力也更加

复杂,要求连接器轻质高强、安装方便,并具备高度的灵活性和韧性。

柔性连接器一般包括铰接连接系统、缆绳和弹簧连接系统、滑动连接系统和混合连接系统。

铰接连接器系统通过栓铰、球铰和销铰将浮动模块连接,早期设计使用简单的水平栓铰链,只允许纵摇运动,后来加入了橡胶锥、滑动套^[42]等元件来增强抗冲击性能,优化了荷载分配和减少摩擦,并通过柔性材料^[43-44]调节刚度以减少冲击和磨损,使系统能够更好地应对动态环境中的各种荷载。

缆绳和弹簧连接系统通过缆绳、弹性体或橡胶连接件连接浮体,具有较大的相对运动空间,便于拆卸和维修,尽管抗剪能力不如铰接系统,但梯形橡胶^[37]、钢丝绳和空气弹簧^[45]等设计更具稳定性,并通过调节刚度适应不同海况,限制模块的线性位移并允许角位移。

滑动连接系统通过允许浮体间在某些方向上自由滑动、限制其他方向运动实现连接。典型设计为垂向自由连接器,允许浮体间垂荡运动,限制横荡和纵荡运动^[46]。滑动连接系统分为旋转自由连接器和旋转固定连接器两种^[47]。旋转自由连接器主要限制横荡和纵荡运动,提供部分自由度,而旋转固定连接器则通过对角连接元件有效限制相对旋转,增加了模块间的稳定性,但易承受较大的扭转力。

混合连接系统结合了铰链、滑动和柔性材料的优势,设计上通过滑轨、橡胶夹层等元件^[48]提供横向和纵向的刚度与灵活性。Xia等^[49]还提出一种由环形弹簧和液压制动器组成的连接器,可调节连接刚度,并提升系统控制性能。

海上FPV平台尚处于开发初期,缺乏连接器装备及设计方法的相关研究。作为一种轻质结构,模块间连接力过大可能引起平台结构的疲劳损伤甚至破坏,而连接力过小可能引起平台运动约束不够、平台上浪或相互碰撞,导致光伏组件失效或平台结构损伤。因此针对海上FPV平台,需要发展新的连接装备及设计方法来提高阵列安全性。

3.3 系泊系统设计及优化技术

目前,海上FPV平台多部署在近岸浅水海域,小幅度的潮位变化即引起显著的水位变化。因此,相比于深水海域油气、风电平台成熟的系泊方式和材料,光伏平台系泊设计更具挑战性。此外,由于浅水海域海底地形不规则引起水深变化,应用于油气、风电平台等传统对称系泊系统显然不适用于光伏平台。针对海上FPV平台应进一步开展系泊优化设计。

海洋工程发展由来已久,针对海上钻井平台、浮

式风电平台等海上浮式结构物的系泊系统设计已经比较成熟,可供海上 FPV 平台参考的形式一般包括悬链式、张紧式、桩-护舷系泊和混合系泊等。悬链式系泊系统利用呈悬链线形状的锚链或缆绳,通过自重和系泊张力产生回复力,典型结构为 3 段式,应用于浅水海域时其悬链线效应较弱,适合与配重或浮筒结合以减缓浮体运动^[18]。张紧式系泊系统通过张紧缆绳固定平台,缆绳始终保持张紧,通常采用钢链与合成材料组合^[50],适用于需要高回复力的深水环境,当应用于浅水海域时可利用柔性材料或结构的变形来吸收大潮差引起的系泊张力变化。桩-护舷系泊系统通过桩基础固定在海底上,利用橡胶护舷吸收外部荷载,适合水深较浅至中等深度的近海工程^[51]。混合系泊系统结合不同系泊方式的优点,提供更高的稳定性和灵活性,应用于多样化的需求环境^[52]。同时,应对海底地形不规则导致的不同区域水深差异,要根据具体环境条件和平台稳定性要求进行非对称系泊设计,以保证平台的稳定性和安全性^[53]。

系泊系统优化旨在设计一种稳定且经济高效的配置,以应对多变的海洋环境(如风、波浪和海流)。优化内容包括结构优化、材料选择和力学分析^[54]。结构优化通过调整系泊点的位置、数量和排列方式,以提高稳定性和降低成本。材料选择则关注钢缆和合成纤维等材料的强度和耐久性,力求成本效益最高。力学分析利用有限元方法计算系统在不同环境条件下的受力情况,确保设计的合理性。

系泊系统优化方法主要包括经典算法和进化算法。经典算法适用于确定性问题,具有扎实的理论基础和丰富的应用案例,但在复杂非线性问题上可能面临计算资源的挑战,如线性规划、非线性规划等。进化算法能够处理复杂的多目标优化问题^[57],且易于并行计算、提升效率,如差分进化、遗传算法^[55]、粒子群优化^[56]等。

3.4 近岸非均匀波浪场模拟方法

不同于传统油气、风电单一平台尺寸在百米级别,海上 FPV 平台通常由多个浮体通过连接构件组成阵列,形成平面尺寸达上千米的排布形式,其所处风场、波浪场等往往不均匀。同时,海上 FPV 平台多部署于近海海域,近岸海底起伏、坡度变化及海岸线复杂导致波浪变形,会形成更加复杂的近岸波浪场。模拟海洋环境中存在的复杂波浪荷载,对于理解平台的动力响应、稳定性和结构安全性至关重要。

非均匀波浪场的影响可能导致局部区域出现更大的波浪压力和结构响应^[58-60],从而影响平台的设计与性能,进而影响其长期运营的经济效益和安全性。

基于非均匀波浪场模拟方法,开展模块化阵列的耦合动力响应分析是优化设计和提升海上 FPV 平台性能的关键。

根据线性叠加原理,波浪场中某一点的波高程可以分解为一系列规则波分量。对于波向角为 θ 的长峰波,在 (x, y) 点处的波高程可表示为:

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{l=1}^L A_l \cos(\omega_l t - k_l x \cos \theta - k_l y \sin \theta + \varepsilon_l) \quad (1)$$

式中, t 为时间, l 为波频分量的序号, L 为波频分量的总数, A_l 为第 l 个波频分量中的波幅, ω_l 为第 l 个波频分量中的波频, k_l 为第 l 个波频分量中的波数,由波频 ω_l 通过色散关系确定, ε_l 为第 l 个波频分量中的随机相位角。

通过波谱计算波频 ω_l 对应的波幅 A_l 为:

$$A_l = \sqrt{2S(\omega_l)\Delta\omega} \quad (2)$$

式中, $S(\omega_l)$ 为第 l 个波频分量的单向波谱密度, $\Delta\omega$ 为波率步长。

因此,对于长波峰波浪场,某一点的波面高程 ζ 可以表示为 $S(\omega_l)$ 、 θ 和 ε_l 的函数分量的叠加:

$$\zeta = \sum_{l=1}^L \zeta_l = \sum_{l=1}^L f(S(\omega_l), \theta, \varepsilon_l) \quad (3)$$

式中, ζ_l 为第 l 个波频分量的波面高程。

对于短峰波浪场,一般采用方向谱 S_ζ 表征不同方向的波分布,具体表现为波频和方向函数的组合形式:

$$S_\zeta = S(\omega)D(\omega, \theta) \quad (4)$$

式中, $S(\omega)$ 为连续单向波谱, $D(\omega, \theta)$ 为波的方向分布。

当地海况的方向函数通常近似为与频率无关,因此方向波谱可表示为:

$$S_\zeta = S(\omega)D(\omega, \theta) = S(\omega)D(\theta) \quad (5)$$

因此,波高程可以表示为:

$$\zeta = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \zeta_{lm} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M f(S(\omega_l), D(\theta_m), \varepsilon_{lm}) \quad (6)$$

式中: m 为波向分量序号; M 为波方向分量的总数; $f()$ 为函数符号,表征单一波频-波向组合对应的规则波分量; θ_m 为第 m 个波向分量的角度。

对于长波峰条件,不考虑波的方向分布,波来自一个方向,即 $D(\theta) = \theta, M = 1$ 。

以单向波谱 $S(\omega)$ 为 JONSWAP 谱为例,用有义波高 H_s 、波峰周期 T_p 、谱峰参数 γ 表示。方向分布采用 $\cos^s()$ 分布,用展宽指数 s 和波的平均方向 θ_p 表示:

$$D(\theta) = \frac{\Gamma(1 + \frac{s}{2})}{\sqrt{\pi} \Gamma(\frac{1}{2} + \frac{s}{2})} \cos^s(\theta - \theta_p) \quad (7)$$

式中, Γ 为伽马函数。

某一点的波高由频率为 ω_l 、方向为 θ_m 的各个波分量组成,最终可表示为这些波谱参数和随机相位角的函数:

$$\zeta = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M f(S(\omega_l), D(\theta_m), \varepsilon_{lm}) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M f(H_s, T_p, \gamma, s, \theta_p, \varepsilon_{lm}) \quad (8)$$

因此,均匀波浪场指所描述的波浪场中任一点处的波谱参数和随机相位角均相同,即序列 $(H_s, T_p, \gamma, s, \theta_p, \{\varepsilon\})$ 相同,反之则认为波浪场不均匀。

近海海域的地形变化如海底地貌的起伏、沙坝的形成或海床坡度的变化,都会影响波浪的传播特性,导致波浪的折射、反射甚至破碎现象。这些现象会引起局部波浪高度、波浪周期和波浪方向的显著变化,形成复杂的非均匀波浪场,这种现象将直接影响海上FPV平台的稳定性。针对变水深海域,由于波浪折射作用,波长以及波的相速度会随水深而变化,Derstine等^[61]基于波浪周期和波长在时空尺度上是缓变的假设,提出了缓坡方程(MSE),描述海浪波动能量、波高、波长及频率等要素的变化,并考虑折射和绕射现象。MSE包括椭圆形缓坡方程、双曲型和抛物型缓坡方程^[62-64]。考虑到海底摩擦带来的波能损失和波浪破碎等因素,进一步发展出改进型缓坡方程^[65-66]。

3.5 海上FPV施工安装技术

海上油气平台、海上风电平台和海上FPV平台在结构特性、服役环境等方面存在显著差异,这直接导致施工安装技术也差异较大。海上油气平台通常体积庞大,风电平台的塔架结构较高,旨在捕捉更大范围的风能,其施工安装技术相对成熟,得益于多年的实践积累。

油气平台和风电平台主要通过吊装法和浮托法进行安装。吊装法利用起重船将预制模块运输至安装现场、完成吊装和固定。在复杂环境荷载作用下,海上吊装作业分析涉及动力环境—浮吊船舶—系泊系统—吊物系统多重耦合作用^[67-68]。浮托法则依赖浮力将平台从驳船升降到位,适应不同潮位^[69-70]。浮托安装作业分析涉及结构与环境荷载之间和结构之间通过接触产生的相互作用,其物理实验研究目前主要集中于两种策略,分别是离散荷载传递阶段的比例模型^[71-72]和建立连续动态荷载传递模型^[69,73]。

然而,这些成熟的安装技术并不完全适用于海上FPV平台。海上FPV平台的结构较轻,模块化设计需要覆盖广阔水域,目前多服役于浅水海域,这与油气和风电平台的安装需求不同。传统的吊装法虽然能应对大型结构,但光伏平台缺乏自稳定性,吊装时容易

受到风浪影响,导致安装不稳定,增加倾覆或损坏的风险。此外,大型浮吊船由于其吃水较深,无法应用于近岸海域,浮托法也存在类似问题^[74]。

尽管如此,海上油气和风电平台的一些施工经验仍对FPV平台有重要借鉴意义。例如,油气和风电平台在模块化建设和分段运输方面积累了丰富的经验,可以为光伏平台的模块化拼装提供参考,基于目前的施工安装方法可以发展应用于海上FPV平台的浅吃水的驳船吊装技术和快捷性拼装技术。

总体而言,海上FPV平台需要开发针对其轻量化结构、近岸服役环境和动态水面特性的施工安装技术。这些新技术需确保平台在安装过程中具备足够的定位精度和结构稳定性,同时应具备应对海洋环境挑战的能力。通过借鉴现有海上平台的部分经验,结合光伏平台自身特点,行业可以发展出适合海上FPV平台施工和安装的新方法,确保海上FPV平台安全、稳定地运行。

3.6 海上FPV运维技术

海上油气平台、风电平台和海上FPV平台的结构特性不同,决定了不同平台运维技术的差异。海上油气平台通常为固定结构,需应对高压和腐蚀性环境,运维依赖重型设备。风电平台则采用塔架结构,运维重点在风机的检修和更换,需专用的起重设备^[75]。相比之下,FPV平台为轻量化结构,主要由浮体和光伏组件组成,受海洋环境影响较大,其运维更依赖智能监控和远程维护,而非重型机械和高强度作业。因此,油气平台的高压维修技术和风电平台的塔架维护方法不适用于FPV。尽管如此,油气平台的风险管理和应急响应机制、风电平台的智能监控和预测性维护技术仍可供参考,帮助提高FPV平台的运维效率和可靠性。

海洋环境为海上光伏的运维带来诸多挑战。盐雾腐蚀会导致设备老化失效,生物附着增加浮体重量,降低发电效率^[3];风浪和潮汐引发结构振动和疲劳损伤^[76]。此外,远程监控难度大,运维工作需克服海上交通不便、恶劣气候和高安全风险,加上缺乏统一的技术标准,运维成本也居高不下^[77]。因此,制定适合海洋环境的运维标准,并优化运维策略,是确保系统长期稳定运行的关键。

海上FPV平台的运维工作主要包括实时监测、预防性维护、清洁与生物附着防治、设备更换与维修^[78]。实时监测通过传感器网络检测系统状态,及时应对潜在问题;预防性维护则是定期检查光伏组件和浮体结构,防止腐蚀和老化,并对逆变器和控制系统进行校准;清洁与生物附着防治则是定期清理光伏组件,避免影响发电效率;设备更换与维修则确保损坏设备及

时更换,并记录维护数据以优化运维策略。

海上 FPV 平台的运维技术创新主要体现在:无人机巡检利用红外传感器进行快速检测,降低人工风险^[79];远程监控依托物联网技术,实现系统状态的实时分析,降低故障率^[80];机器人清洁则进一步优化以应对海洋环境中盐渍、鸟粪和生物附着物的清除,提升清洁效率^[81];预测性维护通过大数据分析提前预测设备故障,减少停机时间和维护成本^[82]。这些创新技术将大大提高 FPV 的运维效率,推动其规模化应用和可持续发展。

4 海上光伏未来发展趋势

随着近海资源的日益饱和,海上 FPV 将逐渐向深远海区域拓展,这意味着海上光伏将要面临更复杂的海洋环境、更加剧烈的风浪条件以及更高的运输和维护成本。因此,保证海上 FPV 平台在深远海环境下长期稳定运行,降低建设和维护成本、提高平台发电效率已成为海上光伏关键技术的发展趋势。此外,协同开发也是提高海洋综合能源开发效率的有效途径。这些趋势显示出海上 FPV 平台作为未来清洁能源解决方案的强大开发价值。

4.1 结构更安全、运行更稳定

深远海区域的优势在于广阔的空间、更稳定的光照条件,以及更少的海上用户干扰。然而,这也意味着技术挑战的增加,包括更复杂的海洋环境、更加剧烈的风浪条件以及更高的运输和维护成本。因此,未来的技术研发应侧重于提高结构抗风浪能力,设计适应深海环境的智能运维系统,革新能源供应与储存技术,以确保海上 FPV 平台在深远海条件下的长期稳定运行。

深远海的极端环境要求更坚固的 FPV 平台结构,未来可能采用强韧轻量的复合材料和创新的浮体设计、增强结构设计安全性以提高抗风浪能力,并使用多点或动态调节锚固系统,以适应实时海况,减少平台漂移和摇摆。

由于远离陆地,传统维护难度增加,未来可开发智能运维系统,如无人船、潜水机器人、无人机等进行远程监控和维护^[79],实时监测平台运行状态,结合大数据与人工智能进行预测性维护,降低人工成本和故障风险^[82]。

深远海设备运输和安装风险大、成本高,未来应提升运输与安装技术,开发自组装模块化浮体技术,减少海上安装时间和难度。同时引入创新的起重和定位技术,如采用大型浮式起重机或重型直升机定位^[83]等创新手段应对海上设备定位和安装的挑战。

未来海上 FPV 还将革新能源供应与储存技术。远离

陆地电网的深远海光伏平台将依赖深海电缆网络进行电力传输,或通过储能系统储存电能。此外,利用电解水技术将电能转化为氢气,通过专用船舶或海底管道运输^[84],可以提升发电系统的可靠性与能源的多样化。

4.2 降本增效

海上 FPV 的发展必须在降低成本和提高效率方面取得突破,以实现大规模商业化。未来,技术进步将提高发电效率、降低初期投资成本和运维成本,以及延长设备寿命。

未来将通过新型太阳能电池技术,如异质结钙钛矿电池^[85-86],提升光电转换效率,同时改进抗紫外线、抗腐蚀的涂层技术,延长组件寿命。轻量化设计和高密度排列将提高发电效率,减少浮体负载,降低结构成本。

海上 FPV 平台的模块化设计和自动化生产线将提高制造效率并降低人工成本,标准化流程确保产品质量一致性。快速连接技术和自适应安装设备将加快海上安装进度,减少天气影响,降低安装成本和风险。

优化智能化运维技术,利用人工智能和大数据进行实时监测和预测性维护,通过传感器网络和无人机巡检,及时发现问题避免停机损失^[79]。智能算法调整光伏组件角度和平台姿态,提升发电效率^[82],远程运维技术也将减少现场操作需求,进一步降低运维成本。

4.3 融合发展

海上 FPV 平台综合成本高,若与其他海上可再生能源相结合,共用海上空间、电缆、系泊系统等资源,将大大降低其运维成本和难度。因此,海上 FPV 可在与其他海上可再生能源和相关技术的协同开发中寻求融合,例如与海上风能、海洋能等其他能源形式的联合开发,实现资源的综合利用。此外,FPV 平台还可以与水产养殖、海上制氢、海水淡化等多种海洋产业结合,形成多功能复合平台。这种协同开发和技术融合将提高资源利用效率,降低单一产业的风险,推动海洋经济的可持续发展。

图 5 为协同开发案例。风光同场方案中海上风电与光伏共用一个海域(图 5(a))。海上风电与光伏共享基础设施,如输电线路、监测设备等,可降低建设和运营成本^[87]。同时,风电和光伏的发电时间互补,风电多在夜间和冬季发电,光伏则在白天和夏季发电,提高整体能源供应的稳定性。FPV 和海上风电的结合还处于起步阶段。中国国家能源集团的离岸型海上 FPV“风光同场”科技实证项目成功实验,两个漂浮式浮体模块总装机容量达到 100 kW,模块采用半潜式钢框架与浮筒复合型结构^[88]。RWE 和 SolarDuck 公司于 2024 年在北比利时海建立一个 0.5 MW 的海上试点项目^[89]。

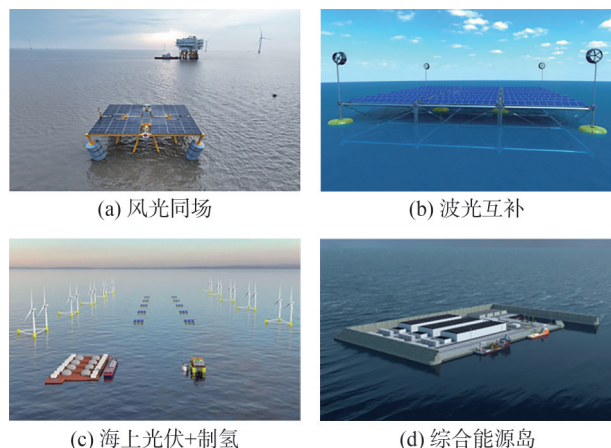


图5 协同开发案例

Fig. 5 Cases of collaborative development

渔光互补方案为海上养殖与光伏系统共用平台,在渔业养殖区上方或周围安装光伏系统。光伏系统可以提供遮阴,减少水温升高,有利于鱼类生长^[90]。水产养殖生产中使用海上光伏能源,降低燃料成本且绿色环保^[91]。鱼类养殖与光伏发电双重收益,可以提高土地或水域的利用效率。

波光互补是在同一海域安装波浪能发电装置和光伏系统(图5(b))。波浪能和光伏能发电时间互补,波浪能更稳定,光伏发电效率高,并且可以利用波浪能装置对光伏平台进行保护,减少平台受损风险。SINN POWER提出的“海洋混合平台”概念集成了风能、太阳能和波浪能,该概念已经生产并经过测试^[92]。

在潮光互补方案中,潮汐能发电区域上方安装光伏系统,利用潮汐能的稳定性弥补光伏发电的间歇性,并且共享基础设施,降低综合成本。

海水制氢与光伏结合方案是在海上漂浮光伏平台上安装电解槽,通过光伏发电直接驱动电解槽将海水分解为氢气和氧气,减少海水制氢的用电需求(图5(c))。海上光伏平台生产的氢气可以储存在专门设计的浮动储氢装置中,方便运输和储存,减少输电损失和基础设施建设成本^[93]。

海水淡化与光伏结合方案中利用光伏电能驱动海水淡化设备,为可再生能源驱动的海水淡化提供解决方案,减少对化石燃料的依赖,对能源和水资源匮乏地区具有重要意义^[94]。

综合能源岛是一种集成多种可再生能源发电、能源存储、输电和其他海洋产业于一体的海上基础设施^[95]。综合能源岛通过风能、太阳能、波浪能、潮汐能等多种海洋能源的联合开发,实现能源的立体化利用(图5(d)),并提供能源的储存和传输服务,甚至支持水产养殖、制氢以及海洋研究等,提高了海洋资源的利用效率^[96]。

5 结 论

本文针对海上FPV平台设计分析的关键科学问题 and 应用进展进行了介绍。通过分析平台的发展现状和面临的挑战,整理了多种典型平台形式,深入探讨了海上FPV平台的关键技术问题,并详细讨论了海上FPV未来发展趋势。主要结论如下:

1)海上FPV平台的结构设计包括浮力结构、支撑结构、锚固系统等,各部分结构的设计和材料选择直接影响平台的稳定性、耐久性和经济性。不同材料在强度、耐腐蚀性和成本等方面具有各自的优缺点,必须根据具体的海洋环境 and 应用需求进行优化选择。

2)海上FPV系统需在恶劣海洋环境中运行,因此其结构稳定性、耐久性和维护性至关重要。模块化阵列在风、波浪、海流等因素共同作用下运行,连接器和系泊系统的设计也影响系统的安全性和性能,因此需深入进行水动力和耦合动力分析,特别是针对柔性连接器和系泊系统的优化。由于海洋环境的不均匀性,传统的均匀波浪分析方法难以准确预测系统响应,需采用非均匀波浪场模拟。此外,施工和运维面临挑战,需优化选址、设计和安装技术,并通过无人机巡检等手段提高运维效率。

3)随着近海资源逐渐饱和,海上FPV将向深远海发展,面临更高的风浪条件和运输维护成本等挑战。未来研究应重点增强结构的抗风浪能力,设计智能运维系统,以及革新能源供应与储存技术以应对复杂的海洋环境。同时,优化光伏组件设计、改进制造与安装工艺,以及应用智能化运维技术,将是提升成本效益和实现可持续发展的关键。海上光伏还可与风电、渔业等结合,提升能源利用效率,并为海水制氢和淡化提供清洁能源,助力全球水资源和能源问题的解决。

海上FPV平台在发展过程中面临多重挑战,包括海洋生态影响、设备腐蚀与生物污染,以及较高的综合成本。平台建设和运营需采取环保措施以减少对海洋生态的负面影响,同时应选用高耐腐蚀材料和防污技术应对海洋环境的严峻考验。较高的初期投资和运维成本限制了其应用,需通过技术创新和成本优化来提高经济可行性。未来,需加强平台长期运行的可靠性研究,并推动关键技术的创新以确保其可持续发展。

参考文献:

- [1] Irena. Renewable energy statistics 2024 [EB/OL]. (2024-07-11)[2024-12-04]. <https://www.irena.org/>.

- [2] Xu Yangyang. Application of new energy photovoltaic power generation technology[J]. *Electronic Technology*, 2022, 51(9): 254–255. [徐羊羊. 新能源光伏发电技术的应用[J]. *电子技术*, 2022, 51(9): 254–255.]
- [3] Claus R, López M. Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 164: 112502.
- [4] Taiyangnews. Ciel et terre global expansion in floating PV technology[EB/OL]. (2024–07–10) [2024–12–04]. <https://taiyangnews.info/technology/ciel-et-terre-global-expansion-in-floating-pv-technology>.
- [5] 澎湃新闻. 海上光伏“集结号”: 躁动的野望和待解的难题[EB/OL]. (2023–07–03) [2024–12–04]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23709216.
- [6] Rubino F, Nisticò A, Tucci F, et al. Marine application of fiber reinforced composites: A review[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(1): 26.
- [7] Ding Rui. The study of dynamic characteristics for chain-type and array-type floating structures[D]. Changsha: Hunan University, 2021. [丁瑞. 链式与阵列型浮动平台动力学特性研究[D] 长沙: 湖南大学, 2021.]
- [8] Kumar M, Niyaz H M, Gupta R. Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 2021(233): 111408.
- [9] Wang Jikai, Zhu Qunzhi, Cai Jingyong, et al. Design and experimental study of a novel flexible PV/T structure[J]. *Energy*, 2024, 296: 131139.
- [10] Ranjbaran P, Yousefi H, Gharchepetian G B, et al. A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 110: 332–347.
- [11] Prabakaran N, Palanisamy K. Analysis and integration of multilevel inverter configuration with boost converters in a photovoltaic system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 128: 327–342.
- [12] Yue Yunfeng, Peng Xinran, Wang Hongqing, et al. Prospect of offshore floating photovoltaic power generation technology and its integrated development[J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(2): 42–50. [岳云峰, 彭欣然, 王洪庆, 等. 海上漂浮光伏发电技术及其融合发展展望[J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 42–50.]
- [13] 能源界. 全球最大的漂浮式太阳能发电系统在马尔代夫落成[EB/OL]. (2019–09–05) [2024–12–04]. <https://www.nengyuanjie.net/article/30121.html>.
- [14] Offshore Energy. Watch: Solar duck debuts its floating solar platform[EB/OL]. (2021–04–30) [2024–12–04]. <https://www.offshore-energy.biz/watch-solarduck-debuts-its-floating-solar-platform/>.
- [15] Offshore Energy. Moss maritime and equinor team up on floating solar[EB/OL]. (2020–01–27) [2024–12–04]. <https://www.offshore-energy.biz/moss-maritime-and-equinor-team-up-on-floating-solar/>.
- [16] 中集集团. 全球首个竹基复合材料海上 FPV 完成交付[EB/OL]. (2023–11–01) [2024–12–04]. <https://www.cimc.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=17&id=3202>.
- [17] CCS. Offshore PV is coming! China's first landscape fusion floating photovoltaic platform “Huanghai” off the line [EB/OL]. (2024–08–05) [2024–12–04]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=202408050833584054>.
- [18] Du Junfeng, Zhang Deqing, Zhang Yanfeng, et al. Design and comparative analysis of alternative mooring systems for offshore floating photovoltaics arrays in ultra-shallow water with significant tidal range[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 302: 117649.
- [19] Xu Tao, Deng Shifeng, Zhang Guangchun, et al. Research on hot spot risk of high wattage solar modules[J]. *Solar Energy*, 2021, 230: 583–590.
- [20] Jia Zhengmei, Liu Yi, Wang Yingying, et al. Flame spray fabrication of polyethylene–Cu composite coatings with enwrapped structures: A new route for constructing anti-fouling layers[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 309: 872–879.
- [21] Li Sheng, Feng Kang, Li Jiaying, et al. Marine antifouling strategies: Emerging opportunities for seawater resource utilization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486: 149859.
- [22] Exley G, Hernandez R R, Page T, et al. Scientific and stakeholder evidence-based assessment: Ecosystem response to floating solar photovoltaics and implications for sustainability[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: 111639.
- [23] Bax V, van de Lageweg W I, Hoozemans R, et al. Floating photovoltaic pilot project at the Oostvoornse lake: Assessment of the water quality effects of three different system designs[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 1415–1425.
- [24] Gorjian S, Sharon H, Ebadi H, et al. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 124285.
- [25] NaturSea–PV. Sustainable energy and materials for healthy oceans[EB/OL]. (2024–10–27) [2024–12–04]. <https://daily27.info/2024/10/27/natursea-pv-sustainable-energy-and->

- materials-for-healthy-oceans/.
- [26] Ali Koondhar M, Albasha L, Mahariq I, et al. Reviewing floating photovoltaic (FPV) technology for solar energy generation[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2024, 54: 101449.
- [27] 索比光伏网. CPIA: 我国海上光伏发展现状及挑战[EB/OL]. (2023-07-03)[2024-12-04]. <https://news.solarbe.com/202307/03/369304.html>.
- [28] Retes M P, Giorgi G, Ringwood J V. A Review of non-linear approaches for wave energy converter modelling [C]// *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference*. Nantes: EWTEC, 2015: 1-10.
- [29] Ransley E J, Greaves D, Raby A, et al. Survivability of wave energy converters using CFD[J]. *Renewable Energy*, 2017, 109: 235-247.
- [30] Jiang Changqing, Xu Peng, el Moctar O, et al. Analysis of a moored and articulated multibody offshore system in steep waves[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2023, 145(4): 041401.
- [31] Liu Xin, Xu Haihua, Shao Songdong, et al. An improved incompressible SPH model for simulation of wave-structure interaction[J]. *Computers & Fluids*, 2013, 71: 113-123.
- [32] Luo Min, Khayyer A, Lin Pengzhi. Particle methods in ocean and coastal engineering[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102734.
- [33] Shi Q J, Xu D L, Zhang H C, et al. Optimized stiffness combination of a flexible-base hinged connector for very large floating structures[J]. *Marine Structures*, 2018, 60: 151-164.
- [34] Zhao Huai, Xu Daolin, Zhang Haicheng, et al. An optimization method for stiffness configuration of flexible connectors for multi-modular floating systems[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 134-144.
- [35] Liu Yaqiong, Ren Nianxin, Ou Jinping. Hydrodynamic analysis of a hybrid modular floating structure system under different wave directions[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 126: 103264.
- [36] Ren Nianxin, Zhang Chi, Magee A R, et al. Hydrodynamic analysis of a modular multi-purpose floating structure system with different outermost connector types[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 176: 158-68.
- [37] Xu D L, Zhang H C, Lu C, et al. On study of nonlinear network dynamics of flexibly connected multi-module very large floating structures[C]// *Proceedings of the Vulnerability, Uncertainty, and Risk*. Liverpool: ASCE, 2014: 1805-1814.
- [38] Shi Q J, Zhang H C, Xu D L, et al. Experimental validation of network modeling method on a three-modular floating platform model[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 137: 92-102.
- [39] Fàbregas Flavià F, McNatt C, Rongère F, et al. A numerical tool for the frequency domain simulation of large arrays of identical floating bodies in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 148: 299-311.
- [40] McNatt J C, Porter A, Chartrand C, et al. The performance of a spectral wave model at predicting wave farm impacts [J]. *Energies*, 2020, 13(21): 5728.
- [41] Riggs H R, Ertekin R. Characteristics of the Wave Response of mobile offshore bases[M]. 1999.
- [42] Yu L, Li R, Shu Z. Recent research and development of the connector design for mobile offshore bases[J]. *The Ocean Engineering*, 2003, 21(1): 60-66.
- [43] Zhu Xuan. Design and finite element analysis for very large floating structure flexible connector[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. [朱璇. 超大型浮体柔性连接器设计及强度分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.]
- [44] Lu Ye, Teng Bei, Wang Yikun, et al. Structural design of hinge connector for very large floating structures[C]// *Practical Design of Ships and Other Floating Structures*. Singapore: Springer, 2021: 197-208.
- [45] Xia S Y, Xu D L, Zhang H C, et al. On retaining a multi-module floating structure in an amplitude death state[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 134-142.
- [46] Koekoek M J. Connecting modular floating structures: A general survey and structural design of a modular floating pavilion[D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [47] Jiang D, Tan K H, Wang C M, et al. Research and development in connector systems for Very Large Floating Structures[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109150.
- [48] Lu Ye, Zhang Haicheng, Chen Yuchao, et al. A new type connection with optimum stiffness configuration for very large floating platforms[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2022, 236(3): 764-778.
- [49] Xia Shuyan, Yu Wen, Xu Daolin, et al. Vibration control of multi-modular VLFS in random sea based on stiffness-adjustable connectors[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1117.
- [50] Pham H H. Numerical modeling of a mooring line system for an offshore floating wind turbine in Vietnamese sea conditions using nonlinear materials[J]. *Water Science and Engineering*, 2024, 17(3): 300-308.
- [51] Ren Nianxin, Yu Yuekai, Li Xiang, et al. Hydrodynamic analysis of a modular integrated floating structure system based on dolphin-fender mooring[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1470.
- [52] Wang Yiting, Xu Shengwen, Wang Lei, et al. Motion responses of a catenary-taut-tendon hybrid moored single module of a semisubmersible-type VLFS over uneven seabed[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019,

- 24(3):780–798.
- [53] Xu Xin, Yang Jianming, Lv Haining. Experimental and numerical analysis for floatover installation on jacket[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(4): 439–445. [许鑫, 杨建民, 吕海宁. 导管架平台浮托法安装数值模拟与模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(4): 439–445.]
- [54] Ja'e I A, Ahmed Ali M O, Yenduri A, et al. Optimization of mooring line design parameters using Mooring Optimization Tool for FPSO (MooOpt4FPSO) with the consideration of integrated design methodology[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112499.
- [55] Jiang Yichen, Duan Yingjie, Li Jiawen, et al. Optimization of mooring systems for a 10 MW semisubmersible offshore wind turbines based on neural network[J]. Ocean Engineering, 2024, 296: 117020.
- [56] Montasir O A, Yenduri A, Kurian V J. Mooring system optimisation and effect of different line design variables on motions of truss spar platforms in intact and damaged conditions[J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(4): 385–397.
- [57] Ja'e I A, Ahmed Ali M O, Yenduri A, et al. Optimization of mooring line design parameters using Mooring Optimization Tool for FPSO (MooOpt4FPSO) with the consideration of integrated design methodology[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112499.
- [58] Cheng Zhengshun, Gao Zhen, Moan T. Wave load effect analysis of a floating bridge in a fjord considering inhomogeneous wave conditions[J]. Engineering Structures, 2018, 163: 197–214.
- [59] Dai Jian, Leira B J, Moan T, et al. Inhomogeneous wave load effects on a long, straight and side-anchored floating pontoon bridge[J]. Marine Structures, 2020, 72: 102763.
- [60] Dai Jian, Leira B J, Moan T, et al. Effect of wave inhomogeneity on fatigue damage of mooring lines of a side-anchored floating bridge[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108304.
- [61] Derstine M S, Brown R T. A compliant connector concept for the mobile offshore base[J]. Marine Structures, 2000, 13(4/5): 399–419.
- [62] Kirby J T, Dalrymple R A. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models[J]. Coastal Engineering, 1986, 9(6): 545–561.
- [63] Yamashita T, Tsuchiya Y, Matsuyama M, et al. Numerical calculation of linear wave propagation in the coastal zone[J]. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 1990, 40: 15–40.
- [64] Bellotti G, Beltrami G M, De Girolamo P. Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models[J]. Coastal Engineering, 2003, 49(1/2): 71–81.
- [65] Huang Hu, Ding Pingxing, Lü Xiuhong. Extended mild-slope equation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001, 22(6): 724–729.
- [66] Lee C, Kim G, Suh K D. Extended mild-slope equation for random waves[J]. Coastal Engineering, 2003, 48(4): 277–287.
- [67] Luo Hanbing, Liu Fusheg, Luo Xiao, et al. Study on the motion responses of the crane vessel “Lanjiang” during topside-lifting operation in beam waves[J]. Journal of ship mechanics, 2021, 25(1): 43–51. [骆寒冰, 刘福升, 罗晓, 等. 横浪海况下“蓝鲸”号起重船吊装上部组块运动响应研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(1): 43–51.]
- [68] Chilinski B, Mackojc A, Zalewski R, et al. Proposal of the 3-DOF model as an approach to modelling offshore lifting dynamics[J]. Ocean Engineering, 2020, 203: 107235.
- [69] Tao Wei, Wang Shuqing, Song Xianchang, et al. Experimental investigation on continuous load transfer process of twin-barge float-over installation[J]. Ocean Engineering, 2021, 234: 109309.
- [70] Fang Xukai, Guo Xiaoxian, Tian Xinliang, et al. A review on the numerical and experimental modeling of the floatover installations[J]. Ocean Engineering, 2023, 272: 113774.
- [71] Bai Xiaodong, Luo Hanbing, Xie Peng. Experimental investigation on motions behavior and loads characteristic of floatover installation with T-shaped barge[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106761.
- [72] Bai Xiaodong, Luo Hanbing, Xie Peng, et al. Experimental investigation on response of mating operations in the elastically-connected twin-barge floatover installation[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2022, 27(1): 549–565.
- [73] Bai Xiaodong, Luo Hanbing, Xie Peng. Experimental investigation on motions behavior and loads characteristic of floatover installation with T-shaped barge[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106761.
- [74] Che Jupeng, Song Xianchang, Tao Wei, et al. Research on the dynamic response characteristics of offshore lifting operations based on a fully coupled model[J]. The Ocean Engineering, 2024, 42(2): 80–92. [车巨鹏, 宋宪仓, 陶伟, 等. 基于全耦合模型的海上吊装作业动力响应特征研究[J]. 海洋工程, 2024, 42(2): 80–92.]
- [75] Li Ning, Han Yu, Qi Lei, et al. Economic analysis of multiple offshore wind power operation and maintenance combination in typical sea area[J]. China offshore platform, 2024, 39(5): 18–22. [李宁, 韩煜, 祁雷, 等. 典型海域多种海上风电运维方案经济性分析[J]. 中国海洋平台, 2024, 39(5): 18–22.]
- [76] Ghigo A, Faraggiana E, Sirigu M, et al. Design and analysis of a floating photovoltaic system for offshore installation:

- The case study of Lampedusa[J].Energies,2022,15(23):8804.
- [77] Gao Jianwei,Guo Fengjia,Li Xiangzhen,et al.Risk assessment of offshore photovoltaic projects under probabilistic linguistic environment[J].Renewable Energy,2021,163:172–187.
- [78] Kumar M,Mohammed Niyaz H,Gupta R.Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems[J].Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021,233:111408.
- [79] Jeffrey Kuo C F,Chen S H,Huang ChaoyangAutomatic detection,classification and localization of defects in large photovoltaic plants using unmanned aerial vehicles (UAV) based infrared (IR) and RGB imaging[J].Energy Conversion and Management,2023,276:116495.
- [80] Felipe T A,Melo F C,Freitas L C G.Design and development of an online smart monitoring and diagnosis system for photovoltaic distributed generation[J].Energies,2021, 14(24):8552.
- [81] Grando M N G N,Maletz E R,Martins D,et al.Robots for cleaning photovoltaic panels:State of the art and future prospects[J].Revista Tecnologiay Ciencia,2019(35):137–150.
- [82] Liu Qifang,Hu Qingpei,Zhou Jinfeng,et al.Remaining useful life prediction of PV systems under dynamic environmental conditions[J].IEEE Journal of Photovoltaics,2023, 13(4):590–602.
- [83] Coppa U,Guarnieri A,Pirotti F,et al.Accuracy enhancement of unmanned helicopter positioning with low-cost system[J].Applied Geomatics,2009,1(3):85–95.
- [84] Kumar S,Baalisampang T,Arzaghi E, et al.Synergy of green hydrogen sector with offshore industries:Opportunities and challenges for a safe and sustainable hydrogen economy[J].Journal of Cleaner Production,2023,384:135545.
- [85] Marques M J M,Lin Weiye,Taima T,et al.Unleashing the potential of industry viable roll-to-roll compatible technologies for perovskite solar cells:Challenges and prospects[J].Materials Today,2024,78:112–141.
- [86] Noman M,Khan Z,Jan S T.A comprehensive review on the advancements and challenges in perovskite solar cell technology[J].RSC Advances,2024,14(8):5085–5131.
- [87] Johnston B,Foley A,Doran J,et al.Levelised cost of energy, A challenge for offshore wind[J].Renewable Energy,2020, 160:876–885.
- [88] 搜狐网.国家能源集团首个离岸型海上FPV“风光同场”成功实验[EB/OL].(2024–04–12)[2024–12–04].https://www.sohu.com/a/771127545_120142535.
- [89] RWE.Solar duck and RWE successfully install offshore floating solar pilot Merganser off dutch coast[EB/OL]. (2024–07–04)[2024–12–04].<https://www.rwe.com/en/press/rwe-offshore-wind-gmbh/2024-07-04-solarduck-and-rwe-successfully-install-offshore-floating-solar-pilot-meganser/>.
- [90] Wang Tengwei,Chang P H,Huang Yingsheng,et al.Effects of floating photovoltaic systems on water quality of aquaculture ponds[J].Aquaculture Research,2022,53(4):1304–1315.
- [91] Scroggins R E,Fry J P,Brown M T,et al.Renewable energy in fisheries and aquaculture:Case studies from the United States[J].Journal of Cleaner Production,2022,376:134153.
- [92] 字节点击.新设计的浮动海洋平台可同时收集风能、太阳能和波浪能[EB/OL].(2020–06–28)[2024–12–04]<https://byteclicks.com/3044.html>.
- [93] Wallington T J,Woody M,Lewis G M,et al.Green hydrogen pathways,energy efficiencies,and intensities for ground, air,and marine transportation[J].Joule,2024,8(8):2190–2207.
- [94] Kalogirou S.Seawater desalination using renewable energy sources[J].Progress in Energy and Combustion Science,2005,31(3):242–281.
- [95] Lin Jianhui,Gu Yujiong,Wang Zijie,et al.Operational characteristics of an integrated island energy system based on multi-energy complementarity[J].Renewable Energy,2024, 230:120890.
- [96] Tosatto A,Beseler X M,Østergaard J,et al.North Sea Energy Islands:Impact on national markets and grids[J].Energy Policy,2022,167:112907.

A Review of Research Progress and Key Issues of Offshore Floating Photovoltaic Platforms

WANG Xiao¹, WANG Shuqing^{1,2*}, SONG Xiancang^{1,2}, WANG Haoge¹, WANG Yanru¹

(1.College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China;

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

Abstract:

Significance With the increasing global energy demand, floating photovoltaic (FPV) systems have continued to advance rapidly over the past decade, driven by their superior energy output and efficiency. Among these systems, offshore FPV installations stand out for their wider deployment potential and access to abundant solar resources, establishing them as a crucial component of future energy solutions. However, the harsh marine environment presents stringent requirements for the structural design, installation, and operational strategies of offshore FPV platforms. This

study provides comprehensive guidance and technical references to support the design and engineering practices of future offshore FPV systems.

Progress The development status and structure of offshore floating PV were briefly reviewed, and the challenges of offshore FPV development were analyzed. The research progress of key issues mainly focused on the design analysis, construction, operation, and maintenance technology of offshore FPV platforms. 1) Offshore FPV platforms consisted of components such as buoyancy units, supporting structures, connection mechanisms, and mooring systems. The material selection and configuration of these components significantly affected the platform’s stability, durability, and cost-effectiveness. Each material was carefully evaluated for its strength, corrosion resistance, and economic feasibility under specific marine conditions. 2) Offshore FPV generally consisted of an array of multiple floating bodies connected by components, and the structural integrity of the platform was influenced by various factors such as monomer strength and connector design. Using a rigid module and flexible connector (RMFC) model, the array coupling dynamic response analysis and flexible connector design were conducted to examine the system’s performance. 3) Offshore FPV was mainly deployed in near-shore shallow waters where small tidal level variations caused significant fluctuations in water levels, leading to drastic changes in mooring system tension. In addition, non-uniform seabed topography required asymmetric mooring system designs. 4) The size of offshore FPV arrays reached hundreds or even thousands of meters, and shallow water effects combined with seabed topography variations resulted in inhomogeneous wave fields. These conditions demanded higher technical requirements for hydrodynamic performance optimization, connection safety improvement, and mooring safety enhancement through coupled dynamic response analysis using inhomogeneous wave field simulation methods. 5) The construction and installation methods currently used for offshore oil and gas platforms and wind power systems, such as lifting and floatover techniques, were not fully applicable to offshore FPV platforms. Existing offshore construction methods required significant adaptation to accommodate the lightweight structures and dynamic surface characteristics of FPV platforms, which necessitated the development of installation technologies specifically designed for their unique structural forms and service environments. 6) The marine environment posed numerous challenges to operating and maintaining offshore PV systems. With reference to the risk management and emergency response mechanisms of offshore oil and gas platforms, as well as the intelligent monitoring and predictive maintenance technologies of wind power platforms, a series of operation and maintenance strategies, including real-time monitoring, preventive maintenance, cleaning and biological attachment prevention, equipment replacement, and maintenance, were implemented and optimized to ensure the long-term stable operation of the system.

Conclusions and Prospects Offshore FPV demonstrates significant development potential due to its vast spatial capacity, high energy quality, and hydrocooling effect. However, the harsh marine environment imposes greater demands on the structural design and engineering practices of offshore FPV platforms. This condition indicates that offshore FPV will encounter more complex wind and wave conditions, as well as higher transportation and maintenance costs. Therefore, ensuring the long-term stable operation of offshore FPV platforms in deep-sea environments, minimizing construction and maintenance costs, and enhancing the platforms’ power generation efficiency have become essential trends in the advancement of offshore PV key technologies. In addition, collaborative development serves as an effective approach to improving the efficiency of comprehensive marine energy utilization. These trends collectively highlight the strong developmental value of offshore FPV platforms as a promising clean energy solution for the future.

Key words: FPV system; development status; technical key issues; future development trend

(编辑 周 璇)

引用格式:Wang Xiao,Wang Shuqing,Song Xiancang,et al.A review of research progress and key issues of offshore floating photovoltaic platforms[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(1):289–302.[王霄,王树青,宋宪仓,等.海上漂浮式光伏平台研究进展与关键技术[J].工程科学与技术,2026,58(1):289–302.]