海上光伏抗恶劣海况技术创新

张　波[1]　王　帅[2]　刘晓峰[2]
1. 山东国华时代投资发展有限公司　山东　济南　250000
2. 中建八局第一建设有限公司　山东　济南　250000

摘　要：海洋复杂多变的水文与气象环境，会从力学扰动、介质腐蚀、姿态偏移等多个维度影响海上光伏场站运行，各类恶劣海况容易引发结构疲劳、设备老化、系统失稳等问题，传统防护手段适配性不足。本文结合海洋环境作用机理与场站运行短板，梳理适配恶劣海况的创新防护技术，从结构优化、防腐防护、姿态稳控、智能调控方面搭建完整技术体系。结合海上光伏运行特征优化抗扰动管控模式，迭代多场景适配的技术升级方向，能够有效改善海洋工况对光伏设备与结构体的负面影响，提升海上光伏场站运行的稳定性与耐久性能。

关键词：海上光伏；恶劣海况；结构优化；防腐防护；智能调控

引言：光伏产业逐步向海洋水域拓展，海上光伏成为新能源开发利用的重要形式。海洋作业环境相较于陆地更为复杂，风浪交变冲击、盐雾高湿侵蚀、潮汐动态扰动等因素长期存在，持续对光伏结构与电气设备产生损耗作用。传统陆上光伏防护方式与加固思路难以适配海洋极端工况，容易出现结构变形、设备衰减、系统运行波动等各类问题。不断创新抗海况防护技术，优化结构设计与运维管控模式，可以持续提升海上光伏系统的环境适应能力，保障海上新能源场站安全长效运行。

1 海上光伏作业环境与海况干扰特征

1.1 海上光伏场区典型海洋环境特征

海上光伏场区所处海洋空间具备区别于陆地场景的特殊环境属性，气象与水文条件复杂且动态变化性强。海面气流运动频繁，无序风浪活动贯穿场区运行周期，水体持续产生起伏涌动与不规则波浪运动。近海区域水汽含量高，空气盐分浓度处于较高水平，潮湿盐雾氛围长期笼罩光伏作业空间。海域昼夜温差、季节温度更替会引发空气与水体温度的持续波动，形成干湿交替、冷热变换的特殊环境状态。部分海域会出现短时强风、大浪、暴雨等多变天气现象，让场区环境始终处于动态不稳定状态，对光伏场站设备与结构体形成持续性外部影响[1]。

1.2 恶劣海况对光伏场站的干扰类型

恶劣海况会从力学、环境侵蚀、姿态扰动多个维度对海上光伏场站形成干扰。风浪产生的持续推力与周期性荷载，会直接作用于漂浮平台、支架结构与组件表层，形成反复力学作用。海水飞溅与盐雾沉降会附着在光伏组件表面、金属支架及电气设备外壳，形成持续性侵蚀影响。海面无序波动会带动漂浮式光伏平台产生倾斜、起伏与偏移，改变设备原有安装姿态与运行角度。极端天气带来的强降水、大风扰动会改变场区局部微环境，造成组件表面污染、结构受力不均等各类问题，持续影响光伏场站整体运行状态。

1.3 海洋环境下光伏设备运行损伤机理

海洋特殊环境会逐步诱发光伏设备物理损伤与性能衰减。盐雾与潮湿水汽会渗透设备表层结构，腐蚀金属支架材质，破坏组件密封保护层，逐步引发材料老化、表层剥落、结构缺损等问题。持续波浪荷载会让支架连接部位、平台固定结构长期处于交变受力状态，结构内部产生疲劳累积。设备长期处于倾斜、晃动的运行状态，内部电气元件受力不均，会加剧部件损耗，引发运行稳定性下降。各类环境因素长期叠加作用，会逐步放大设备损伤程度，改变光伏设备原有工作性能。

1.4 海上光伏结构运行的环境制约因素

海洋复杂工况对海上光伏结构设计、布设方式与运行模式形成多重制约。海面动态荷载无固定规律，结构受力状态随时发生变化，对整体结构稳定性与抗变形能力提出更高要求。高盐高湿的特殊氛围，对结构材质耐腐性能、设备密封防护能力形成硬性约束。海域空间开阔、风浪扰动无间断的特点，压缩了结构静态稳定运行的空间。传统陆地光伏结构设计标准难以适配海洋复杂工况，常规防护方式无法抵御长期海洋环境侵蚀与力学扰动，限制海上光伏场站长效稳定运行。

2 恶劣海况下海上光伏运行隐患与技术短板

2.1 风浪荷载作用下支撑结构运行缺陷

海上光伏支撑结构长期暴露于开放式海域，持续承受无序风浪带来的交变荷载。风场气流的无序冲击会对支架、浮体及连接构件形成持续性外力挤压与拉扯，让结构受力状态始终处于动态波动中。波浪往复拍打会造

成结构局部应力集中，连接节点极易出现松动、偏移等隐性问题[2]。结构体长期承受往复式力学作用，会逐步产生形变累积，刚性强度逐步降低。部分支撑结构布设形式较为单一，整体抗形变冗余不足，难以抵御高强度风浪的持续冲击，会逐步显现结构松动、局部变形等各类运行缺陷。

2.2 盐雾高湿环境下光伏设备老化问题

海洋空域高盐、高湿的环境特质，会持续加速光伏配套设备的老化进程。悬浮盐雾微粒会附着于光伏组件表面，逐步渗透封装保护层，破坏组件内部电池结构，削弱光电转换能力。金属材质的支架、紧固件、接线构件会遭受盐雾腐蚀，表层材质逐步氧化锈蚀，构件厚度持续损耗。潮湿水汽会侵入电气接线部位与控制终端，引发线路绝缘性能下降、接触性能变差等问题。长期的腐蚀与水汽渗透作用，会持续降低设备运行可靠性，缩短光伏设备整体服役周期。

2.3 海浪潮汐扰动下系统稳定性不足问题

海域潮汐涨落与海浪无序涌动，会持续改变海上光伏系统的整体运行姿态。水体升降运动带动浮式平台整体起伏，改变光伏组件原始布设倾角，影响设备受光状态。海浪横向涌动会推动平台产生位移、偏转，让整套系统的受力分布持续改变。频繁的姿态变动会造成设备内部构件反复摩擦、挤压，加剧机械损耗。系统布设结构缺少针对性的稳控设计时，小幅潮汐扰动便可引发设备运行姿态异动，造成光伏系统运行状态波动，难以维持长效稳定的工作状态。

2.4 传统海上光伏抗环境技术的适配局限

传统海上光伏防护技术多沿用陆地光伏改良方案，适配海洋复杂工况的能力存在明显不足。常规防腐手段仅能实现表层简易防护，无法应对海洋盐雾长期渗透侵蚀的作用机制。结构加固方式侧重静态荷载防护，对海域动态、交变的风浪荷载适配性较差。传统稳控技术调控维度单一，无法应对潮汐、风浪耦合作用产生的姿态扰动。这类技术模式适配场景有限，难以适配恶劣海况的长期、复杂扰动，无法满足海上光伏长效安全运行的技术需求。

3 海上光伏适配恶劣海况的关键技术创新

3.1 抗风浪动态适配结构优化技术

海域风浪荷载呈现无序交变、持续冲击的运行特征，常规刚性支撑结构无法适应高频动态外力作用，长期服役过程中容易产生应力累积与塑性形变问题。抗风浪动态适配结构优化技术依托海域极端工况的荷载特征，对浮体平台、支撑支架及连接节点构造进行精细化改良优化。调整整体框架的空间排布方式，合理控制支架有效跨度，缩短受力传导路径，让风浪产生的集中荷载实现均匀分散。优化构件截面结构形式，选用承载性能更优的型材替换传统结构材料，提升整体框架的抗弯与抗形变能力。创新柔性节点构造形式，摒弃完全固结的刚性连接思路，利用可控的微量形变缓冲风浪冲击能量[3]。改良后的结构体系可以适配复杂多变的海上风浪工况，减少结构变形、构件松动、节点疲劳等常见问题。

3.2 海洋防腐耐候防护技术创新

近海海域盐雾浓度高、空气湿度大，叠加昼夜温差反复波动，会持续侵蚀光伏金属构件与组件封装层，加速设备性能衰减。海洋防腐耐候防护技术突破传统单层喷涂防护的局限性，搭建多层复合防腐防护体系适配海洋严苛工况。技术选用ISO9223标准C4及以上等级海洋专用防护材质，重新调配涂层配比，提升涂层致密性与抗渗透能力，有效阻隔盐雾微粒与水汽侵入构件内部。针对接线端口、构件接缝、边角缝隙等腐蚀高发区域，增设密封封堵结构，补齐常规防护盲区。配套采用316L不锈钢紧固件替代普通连接件，从源头降低电化学腐蚀速率，长效维持设备与结构体的完整运行状态。

3.3 海况扰动下系统稳定控制技术

潮汐周期性升降与海浪无规律涌动，会持续改变漂浮式光伏平台的空间姿态，引发倾角偏移、平面晃动、水平位移等问题，破坏系统稳定运行状态。海况扰动下系统稳定控制技术依托海域水体运动规律，搭建适配漂浮平台的动态姿态调控逻辑。全域布设高精度感知单元，实时采集平台浮动幅度、倾斜角度与位移数据，精准捕捉细微工况异动。配置弹性系泊与限位缓冲结构，优化系泊布设角度与预紧参数，大幅削弱海浪、潮汐带来的大幅度晃动偏移。结合平台实时姿态数据微调组件布设倾角，始终维持最优受光平面，减少构件往复摩擦产生的机械损耗，全方位强化光伏系统在动态海域中的运行平稳性。

3.4 海上光伏环境自适应防护调控技术

传统海上光伏防护模式参数固定、调控维度单一，无法适配海况强弱交替、工况多变的作业场景，防护资源匹配存在冗余或不足的问题。海上光伏环境自适应防护调控技术整合结构抗扰、材质防腐、姿态稳控的核心优势，构建动态可调的智能防护体系。依托实时采集的风速、浪高、盐雾浓度等环境数据，分级划分海况等级，自主切换对应的防护调控策略。常规海况下维持基础防护模式，保障系统平稳低耗运行。极端海况下主动激活强化防护机制，上调结构稳控力度与防腐防护层

级。彻底打破传统固定防护模式的僵化短板，精准适配各类复杂海洋工况，形成全方位、自适应的恶劣海况综合防护能力。

4 海上光伏抗恶劣海况技术优化与提升路径

4.1 结构体系抗海况能力优化方式

海上光伏结构体长期承受海域风浪、潮汐的循环外力作用，结构疲劳损伤会随运行时长逐步累积。针对支撑框架、浮体平台、连接节点等核心受力部位，开展针对性的结构性能优化升级。结合场区海域风浪荷载分布特征，调整整体结构的刚度分布，优化应力传导路径，弱化局部应力集中带来的结构损耗。对老旧刚性结构进行柔性改造，增设缓冲构造吸纳外力冲击，提升结构体系对动态海况荷载的耐受上限[4]。细化不同海域工况的结构设计标准，针对风浪强度偏高的作业区域强化构件截面强度，优化浮体配重布局。持续完善结构抗扰动设计体系，从构型改造、参数优化、构造升级多个维度提升整体结构的稳定性与耐久性能。

4.2 设备耐海洋环境性能升级路径

海洋盐雾腐蚀、高湿环境、温度交变是造成光伏设备性能衰减的核心诱因。设备耐候性能升级可从材料改良、防护升级、结构密封多个维度稳步推进。迭代更新光伏组件封装材料，选用高致密、抗老化的新型封装材质，提升组件表层抵御盐雾渗透与紫外线老化的能力。优化金属构件防腐体系，升级多层复合防护涂层配比，强化涂层附着力与抗腐蚀穿透能力。细化电气设备密封设计，优化接线端口、设备箱体的密封构造，阻隔水汽与盐雾侵入设备内部。结合设备不同部位的损耗规律制定差异化升级方案，针对性解决腐蚀、老化、绝缘下降等常见问题，延长整套设备体系的海上服役周期。

4.3 场站运行抗扰动管控模式优化

传统海上光伏场站管控模式较为粗放，难以应对海况动态波动带来的各类运行扰动。优化现有场站管控逻辑，搭建适配海洋复杂工况的精细化运行管控体系。依托全域环境感知数据，掌握海域工况变化规律与场站设备运行状态的关联关系。调整传统固定化运维管控策略，根据海况变化动态调整设备巡检频次与状态监测精度。完善场站异常状态识别与处置流程，针对风浪扰动、设备腐蚀、姿态偏移等问题建立专属处置机制。细化各设备、各结构的运维管控标准，填补复杂海况下的运维管理空白，提升场站整体运行的抗扰动水平与运行稳定性。

4.4 多海况适配的技术迭代发展方向

海洋工况具备多元化、波动性、耦合性的特征，单一防护技术难以适配复杂多变的海上作业场景。技术迭代发展聚焦多工况耦合防护、全域适配、长效提质的核心方向推进升级。整合结构抗扰、材料防腐、姿态稳控、智能防护等各类技术优势，构建一体化的综合防护技术体系。深挖不同海域、不同季节的工况差异，针对性迭代技术适配逻辑，拓宽技术体系的适用场景。持续更新智能防护调控算法，深化环境数据与设备防护策略的联动机制，提升场站自主防护、自主适配的智能化水平[5]。稳步推进海上光伏抗海况技术的精细化、集成化、智能化升级，适配各类复杂恶劣海洋工况的长期运行需求。

结束语

海洋特殊工况带来的力学扰动与介质腐蚀，是制约海上光伏规模化、长效化发展的主要因素。各类新型结构优化、防腐防护、姿态稳控与自适应调控技术，可有效化解恶劣海况引发的各类运行隐患。从结构性能、设备耐候、运维管控等维度开展系统性优化，持续迭代多工况适配的综合防护体系，能够持续提升海上光伏系统的环境耐受能力。整套抗海况创新体系与优化策略可为海上光伏抗海况设计与运维升级提供合理参考。

参考文献

[1]胡瑞.海上光伏施工安全风险评估模型构建与应用研究[J].中国高新科技,2026(4):58-60.

[2]袁博,李招招,宋璇,等.海上光伏电站智慧运维一体化平台研究及应用[J].西北水电,2025(4):123-129.

[3]张岩峰,崔振磊,惠星,等.桩基固定式海上光伏支撑结构防腐蚀设计研究[J].西北水电,2025(4):36-41.

[4]刘军,左刚,潘欣,等.桩基固定式海上光伏支撑结构防腐蚀应用研究[J].西北水电,2025(4):24-30.

[5]王鹏,陈良水,杨庆,等.海上浮式光伏组件及原材料检测技术研究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(8):217-219,223.