

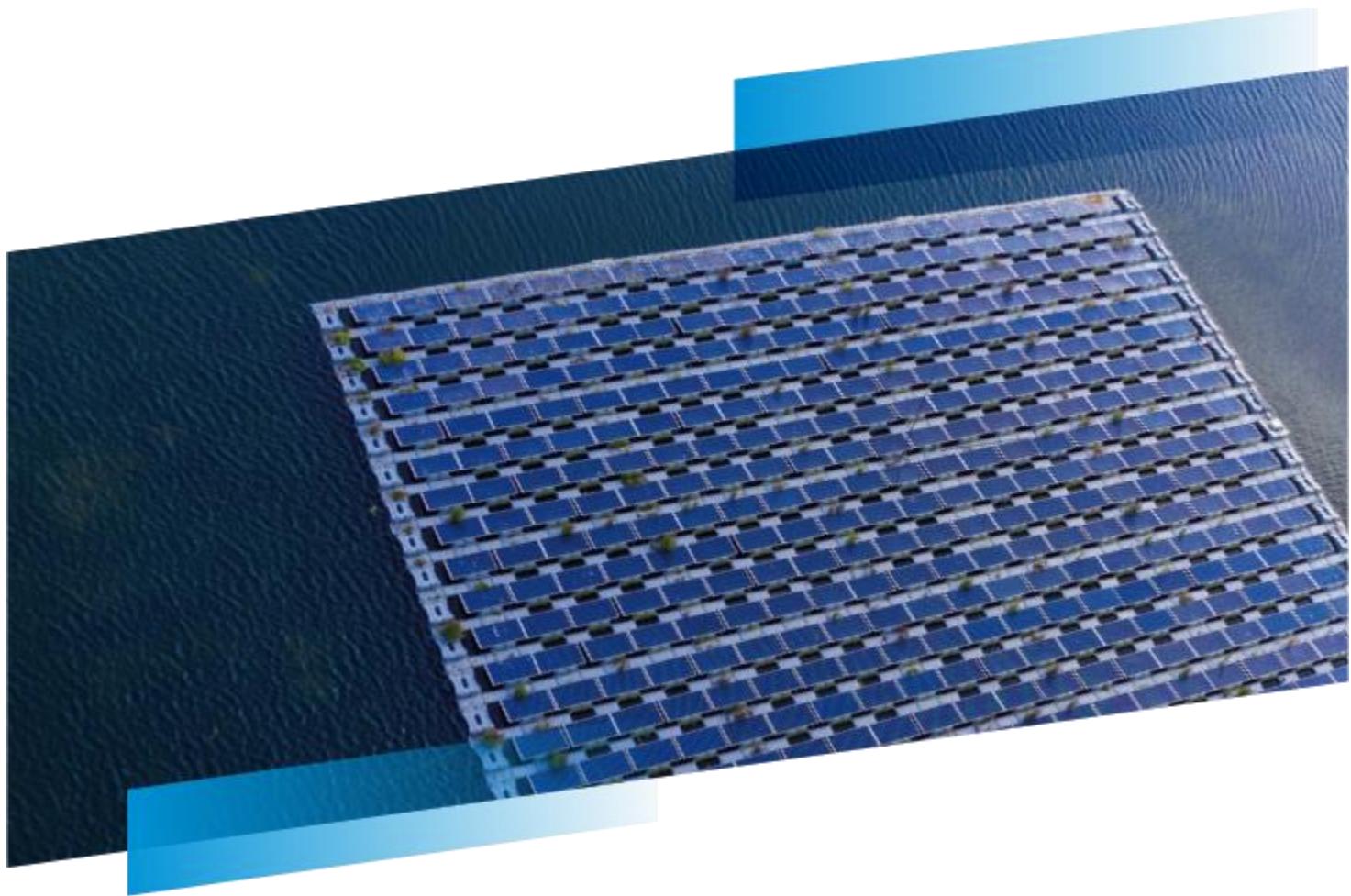


天赋能源 合而为-

全球领先的光储智慧能源  
和能源物联网整体解决方案提供商



天合光能微信公众号



# 天合光能 海上光伏组件白皮书

Offshore PV Module WhitePaper

# Offshore PV Module WhitePaper

## 海上光伏组件白皮书

### Foreword

### 前言

As a new application scenario, Offshore PV will face severe challenges from the marine environment, such as high temperature, high humidity, salt spray corrosion, gales, waves, precipitation. The PV modules need to have enhanced reliability. This whitepaper aims to provide the matters to be noted for the application of PV modules in coastal and offshore areas, for the reference of PV system application clients.

作为全新的应用场景,海上光伏面临“三高三强”(高温、高湿、高盐雾、强风、强浪、强降水)的严苛环境挑战,对光伏组件可靠性提出更高要求,本白皮书旨在说明光伏组件在沿海地区、海上环境使用时的注意事项,供光伏系统应用端参考使用。

# 目录

1. 海上光伏需求背景和主要应用形式 .....	01
1.1 中国区 .....	01
1.2 其他区域 .....	01
2. 海上光伏分类及目前现状挑战 .....	01
2.1 海上光伏分类 .....	01
2.2 海上光伏主要环境挑战及失效形式 .....	02
3. 海上光伏组件解决方案 .....	01
3.1 组件解决方案 .....	03
3.2 海上光伏组件认证 .....	05
3.3 210-66 版型 700W+N 型组件在海上光伏项目中的优势 .....	05
3.4 海上光伏组件沿海和海上注意事项 .....	03
3.4.1 组件与材料选型要求 .....	07
3.4.2 安装过程技术规范 .....	07
3.4.3 安装人员资质规范 .....	07
3.4.4 合规与生态保护要求 .....	07
3.4.5 运维保障技术规范 .....	07
4. 天合光能海上光伏相关可靠性加严测试 .....	09
4.1 机械载荷 .....	09
4.2 高温载荷 .....	11
4.3 盐雾腐蚀 .....	12
5. 天合光能海上光伏案例 .....	15
6. 海上光伏发展趋势与展望 .....	16

天赋能源 合而为一

全球领先的光储智慧能源  
和能源物联网整体解决方案提供商

# 01

## 海上光伏需求背景和主要应用形式

近些年,随着陆上光伏装机量的持续增长,土地资源正在成为制约光伏规模化发展的关键因素。相反,海域面积宽广、日照充足且无遮挡,开发的空间相当可观,迅速进入人们的视野。全球海上光伏潜在容量约4000GW,总体潜在容量非常巨大。

### 1.1 中国海上光伏需求

在国家新能源政策驱动下,我国各沿海省份积极响应党中央实现“双碳”的目标,陆续着手重点发展海上光伏产业,主要由于:沿海地区电力消耗较大,新能源发展受限于土地资源约束(集中式电站涉及土地征用,分布式光伏贡献不足);沿海省市海洋资源丰富,海上光伏和海上风电协同发展能够有效优化投资成本(海缆、变电设施等);海上光伏还可以与水产养殖结合,可提高整体投资收益;海上光伏的发电效率在相同光照条件下,较地面光伏有一定增益。我国海岸线长达18000公里,沿海滩涂面积超过15000平方公里,其中桩基式海上光伏可安装面积超过1800平方公里,滩涂桩基式光伏可安装面积超过2000平方公里。从理论上讲,可安装海上光伏超过100GW,市场前景广阔。

### 1.2 其他区域海上光伏需求

亚太地区是海上光伏发展的另一个蓝海区域。尤其是东南亚地区人口稠密,海岛众多,土地资源稀缺,海上光伏成为该地区的能源转型的主要发展方向之一。从理论上讲,亚太地区尤其是东南亚地区可安装海上光伏超过50GW,市场前景广阔。

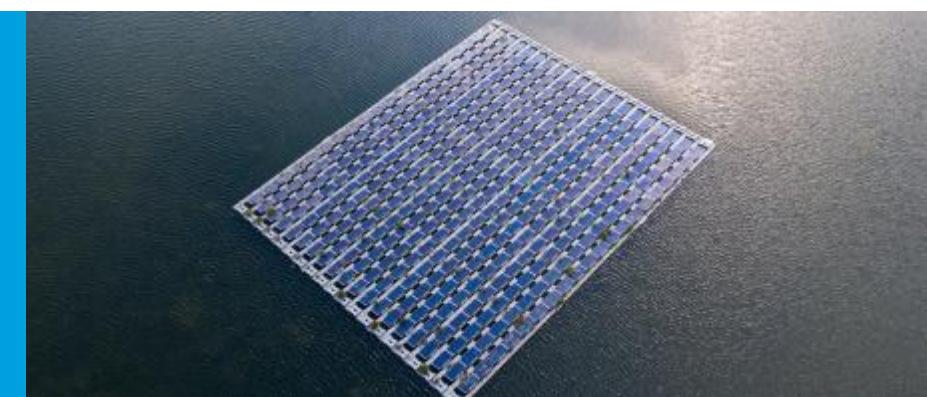
拉美地区同样也将目光投向海上光伏。拉美地区同样海岸线绵长,沿海地区电力消耗较大,新能源发展受限于土地资源约束。因此,发展海上光伏可以有效解决能源消耗问题。



近海桩基固定式



远海漂浮式



### 2.2 海上光伏主要环境挑战及失效形式

相比陆地,海上光伏因其特殊的环境,光伏组件面临的环境挑战也较陆上光伏更为复杂,风、浪、流作用下浮体结构所受载荷激增,系统安全面临严峻挑战:“三高三强”(高温、高湿、高盐雾、强风、强浪、强降水)对光伏组件综合作用,导致发电效率下降,寿命缩短。

# 02

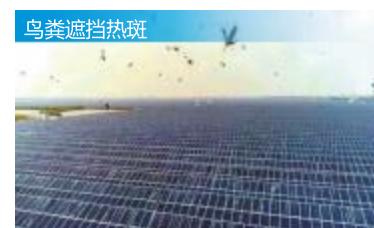
## 海上光伏分类及目前现状挑战

### 2.1 海上光伏分类

海上光伏发电作为一种新型能源利用方式和资源开发模式,在海洋上利用光伏技术建立起发电站,具有发电量高、土地占用少、易与其它产业相结合等特点。海洋光伏相较陆上光伏,具有天然的环境优势:水面开阔没有遮挡物,日照较长且利用充分(水面反射光),可显著提升发电量。根据水深和离岸距离,海上光伏主要分为桩基固定式和漂浮式。

桩基固定式光伏电站也称架高式水面光伏电站,常适用于水位较浅、无场地沉陷等地质灾害、水位变化较小的水面场地,如水产养殖场、盐场排淡池等。适用于水深小于8米、地质稳定、水位变化较小的滩涂场地,目前是海上光伏建设的主流。此类电站可采用“渔光互补”的建设模式,即利用水产养殖集中地区的池塘海洋资源,开发建设光伏发电项目,采用海上发电、水下养殖的模式,实现多产业的互补发展。

漂浮式光伏电站,则是借助浮体材料与锚固系统使光伏组件、逆变器等发电设备漂浮在海面上进行发电,适用于水深大于8米,受台风影响不大的水域。从长远经济性来看,漂浮式预计将是未来主要的海上光伏应用形式。漂浮式光伏电站应用场景更广泛,并且环保问题更小,从全球来看,目前全球有60多个国家在积极推进海上漂浮式光伏电站建设,其中有超过35个国家拥有350个漂浮式光伏电站。

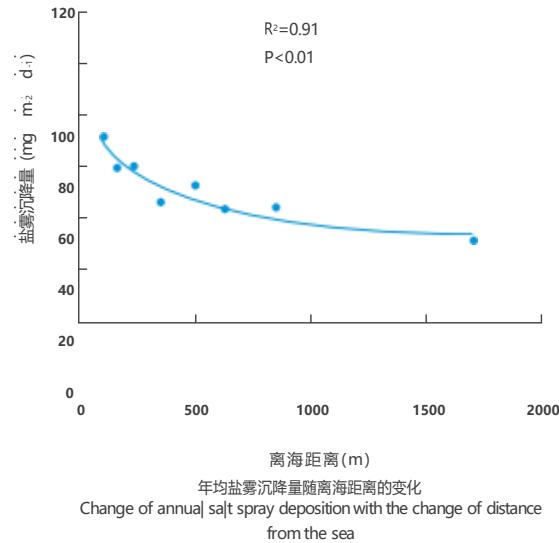


# 03

## 海上光伏组件解决方案

### 3.1 组件解决方案

根据不同季节盐雾沉降量与离海距离间的相关性研究<sup>[1]</sup>,在离海距离500m以内的范围,盐雾沉降量随离海距离的增加而下降,超过500m后,盐雾沉降量下降缓慢,在离海2000m范围内,盐雾沉降量在60mg .m<sup>-2</sup> .d<sup>-1</sup>。



[1]侯梦莹,李芊芊,袁甜甜.南方滨海地区盐雾沉降的时空分布——以福建古雷半岛为例[J].生态学杂志,2019,38(8):2524-2530

基于此,天合光能提供海上漂浮式和桩基固定式两种产品解决方案:

离海距离示意图:



定义	离岸距离	组件方案	螺栓要求	支架要求
漂浮式海上光伏	远海及适宜的近海区域	双玻+前板玻璃双镀膜+ AA15型材+IP68接线盒及连接器+防尘塞 建议:连接器双重防护+防水线缆	防腐	防腐
桩基固定式海上光伏	近海区域及离海岸500m以内	双玻+前板玻璃双镀膜+ AA15型材+IP68接线盒及连接器+防尘塞 建议:连接器双重防护	防腐	防腐
其他位置	离海500m~2km以内	常规双玻产品	标准	标准
	离海距离≥2km	常规单玻/双玻产品	标准	标准

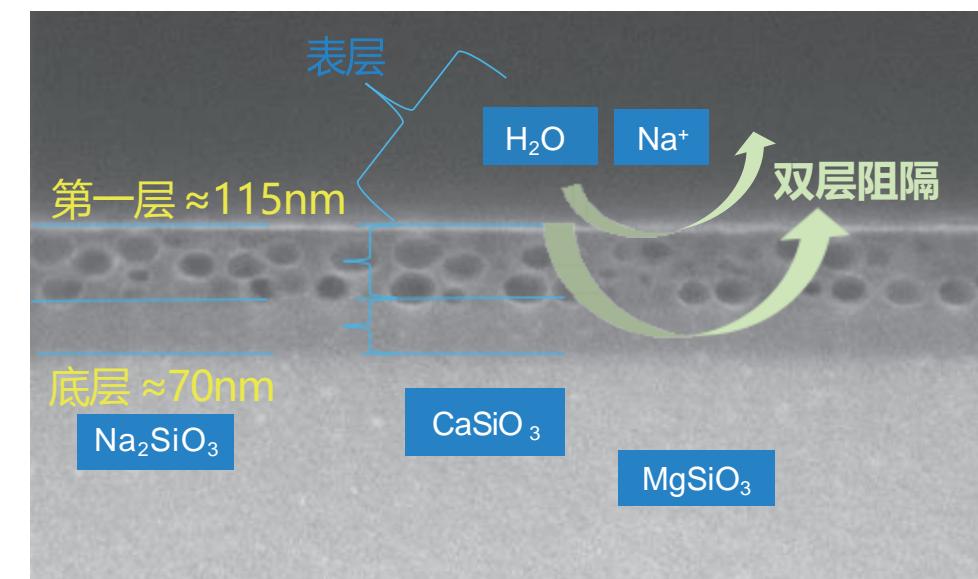
连接器防尘塞:  
重点解决组件安装期间,早晚凝露水汽侵入接插部位。



连接器双重防护:  
连接器本身为IP68等级/抗盐雾S8,通过增加连接器保护罩,可以起到双重防水防盐雾作用。



双镀膜玻璃:  
前板玻璃通过增加一层致密的SiO<sub>2</sub>层,可以有效保护光伏玻璃基体受水汽及盐雾的腐蚀,耐候性更优。



### 3.2 海上光伏组件认证

天合光能至尊系列组件通过TUV莱茵海上光伏2 pfg 2930/02.23认证,是全球首家通过该认证的光伏企业,成为光伏产品在海上应用的重要里程碑。



产品	天合N型组件	N型对比组件A	N型对比组件B
尺寸(mm)	2384*1303	2465*1134	2465*1134
功率(W)	680	610	610
开路电压(V)	47.4	51.47	55.25
短路电流	18.18	15.01	14.11
单组串组件块数	29	26	24
低压电气成本(¥/W)			
逆变器	0.0241	0.0242	0.0242
汇流箱(含施工)	0.0013	0.0017	0.0018
连接器(含施工)	0.0015	0.0019	0.0020
光伏线缆(含施工)	0.0247	0.0258	0.0264
低压直流线缆(含施工)	0.0687	0.1020	0.1162
接地线(含施工)	0.0026	0.0029	0.0029
桥架(含施工)	0.0062	0.0078	0.0085
电缆沟(含施工)	0.0096	0.0094	0.0120
逆变器安装	0.0005	0.0005	0.0005
合计	0.1391	0.1761	0.1945
差值	BL	0.0370	0.0554
结构成本(桩露出5.5m)(¥/W)			
光伏支架(含施工)	0.2605	0.2648	0.2541
桩基础(含施工)	0.2793	0.2701	0.2926
合计	0.5398	0.5350	0.5468
差值	BL	-0.0048	0.0070
土地租金(¥/W)			
合计	0.1375	0.1385	0.1382
差值	BL	0.0010	0.0007
BOS成本(¥/W)			
总计	0.8164	0.8495	0.8795
BOS成本差值(¥/W)			
总计	BL	0.0331	0.0631

因海洋环境的特殊性,海上光伏项目有其自身特点。首先,在海上光伏的应用场景中,海域广阔,无遮挡,比较适合长阵列支架的布置;其次,外海水深浪大,风力条件复杂,且北方还需考虑结冰影响,固定式光伏项目桩基础设计较长,桩型较大,基础材料及施工成本相较陆上光伏,均高出很多;此外,海洋环境对材料的耐风、耐防腐、耐湿热、耐老化等要求高,有效减少材料量带来的经济效益比陆地光伏项目更好。

天合光能至尊N型700W系列组件,凭借低开压、高功率的产品设计,在海上应用会有更加明显的BOS成本优势。

### 3.3 210-66版型700W+N型组件在海上光伏项目中的优势

除了应对可靠性的技术难题,海上光伏成本控制也极为关键,以某渔光互补项目为例进行测算:210-66版型N型组件相比参考组件BOS成本可节约¥0.03-0.06。

## 3.4 海上光伏组件沿海和海上注意事项

### 3.4.1 组件与材料选型要求

通用技术要求：海上光伏场景具有高温、高湿、高盐雾的显著特征，组件及材料选型需重点满足以下要求：光伏组件必须采用双玻结构，提升耐候性与结构稳定性；核心材料需具备优异的抗高温高湿、抗盐雾侵蚀性能，采用特殊加强型 BOM 清单，确保在极端海洋环境下的长期可靠性。

#### 分场景选型方案

1. 桩基固定式海上光伏：组件安装高度要注意组件下沿高度需高于当地 30~50 年一遇的极限浪高，防止海浪直接拍击组件造成物理损坏；
2. 漂浮式光伏：采用 HDPE（高密度聚乙烯）材质的漂浮结构时，优先选择内陆湖泊、水库等环境温和的水域应用；线缆选型与防护：需选用长度适配的组件线缆，避免漂浮阵列因受力不均产生拉扯，导致线缆端子损坏。

### 3.4.2 安装过程技术规范

1. 防电偶腐蚀措施：组件与支架的连接部位需采取针对性防护，例如选用喷漆处理螺栓或达克罗涂层螺栓等，避免“铝-钢”异金属在湿盐雾环境中发生电偶腐蚀，延长连接节点使用寿命；
2. 驱鸟装置配置：需增设驱鸟装置，一方面可减少鸟类活动导致的组件遮挡，降低热斑效应风险；另一方面能减少鸟类粪便堆积等带来的运维负担，降低后期运维频率。
3. 漂浮式系统密封措施：浮体拼接时需采用专用密封胶，确保水密性；锚泊系统安装后需校验张力平衡，避免阵列漂移。

### 3.4.3 安装人员资质规范

1. 基础通用资质：需持有有效的海上作业操作证、高空作业证（涉及组件高空安装时），同时具备低压电工证（涉及线缆连接、电气接线等操作）。
2. 专项作业资质：桩基础施工人员需额外持有桩基施工相关资质（如地基与基础工程专业作业人员证书），熟悉海上桩基定位、钻孔、浇筑等专业操作；漂浮式项目安装人员需具备水上作业专项资质，了解漂浮结构组装、密封防水、水上吊装等核心工艺。
3. 安全培训资质：需完成海上应急救援、防台风、防溺水、防触电等专项安全培训并取得合格证明，具备应对海上突发风险的处置能力；
4. 合规认证要求：需符合项目所在地劳动法规及行业管理要求，部分区域需额外提供健康证明（适应海上作业环境）、特种设备操作证（如涉及大型吊装设备操作时）。

### 3.4.4 合规与生态保护要求

针对海光桩基和漂浮式海上光伏项目，结合安装过程中对生态保护的关注，人员管理以及合规运营需求，明确安装人员的注意事项如下：

#### 生态保护技术要求

1. 桩基施工前需开展详细的海洋生态环境调研，避开珊瑚礁、红树林、鱼类产卵场等生态敏感区域。
2. 施工过程中需控制噪音污染、泥浆泄漏等，选用环保型施工材料，减少对海洋水体及水生生物的影响。
3. 施工完成后及时清理施工现场的建筑垃圾、废弃耗材，恢复周边海域环境原貌。

#### 施工合规与管理要求

1. 桩基施工需符合当地海洋开发、环保等相关法律法规及行业标准，提前办理齐全施工许可、环境评估等相关审批文件。
2. 建立完善的现场施工管理制度，明确各岗位安全职责，定期开展施工质量与安全巡检，及时整改违规操作。
3. 留存完整的施工记录（如桩基施工参数、材料验收报告、人员培训记录等），确保项目全流程可追溯。

#### 人员与周边协同

1. 安装人员安全保障：为现场人员配备全套防坠落、防盐雾、防溺水等个人防护装备（PPE），定期开展海上作业安全培训（如应急救援、防台风等）。
2. 合规用工管理：严格遵守当地劳动法规，保障安装人员的劳动报酬、休息休假等合法权益，杜绝违规用工。
3. 周边社区沟通：施工前与临近沿海社区、渔业从业者等做好沟通，告知施工周期、作业范围及防护措施，减少对当地居民生产生活的影响。

### 3.4.5 运维保障技术规范

1. 线缆安全防护与管控  
项目设计初期优先选用双层绝缘类防水线缆，接头采用快速插拔式连接器，便于维护期间需要拆卸，维护难度降低，海水侵入腐蚀的概率降低；漂浮系统/海上项目随浪涌、潮汐周期性晃动，会导致组件间的连接线缆反复拉伸，长期受力引发金属疲劳断裂；同时盐雾腐蚀端子的金属触点，会导致接触电阻升高，有烧毁风险。建议每月开展外观巡检，重点关注线缆接头是否松动、护套是否开裂，发现异常立即停机维护，恶劣天气台风 / 风暴潮后需加密巡检频次。
2. 组件热斑风险管理  
鸟粪含高盐分与酸性物质，不仅遮挡组件受光面，还会形成局部热斑（温度可达 80°C 以上），长期会导致电池片隐裂、功率衰减，甚至组件烧毁。同时盐尘、海洋沉积物会与鸟粪结合，加剧遮挡效应。建议定期安排鸟粪清洗工作，可雨季每 3-4 个月清洗 1 次；旱季每 1-2 个月清洗 1 次，优先用低压淡水冲洗。
3. 支架与紧固件维护  
海上光伏项目的使用寿命，从一定程度上取决于支架及紧固件的后期维护。螺纹长期受盐雾腐蚀会导致螺栓锁死，出现配件无法拆卸和更换的问题。此外，海上强风会导致支架晃动，出现紧固件松动的情况。因此定期对支架等紧固件作复检是有必要的，可对支架喷涂锌铝涂层，增强防腐能力。
4. 水下部件防生物附着维护  
漂浮式或近海项目的水下部件如锚链、水下支撑支架等为硬质表面，易于藤壶、贻贝等生物附着和繁殖生长，长久以往会增加光伏系统的负载，若遇风浪天气组件倾斜影响整体发电量；项目清理的难度和运维成本也相应增加，有概率出现清理生物时破坏配件的情况。建议每半年用水下机器人巡检水下部件，清理附着生物；也可在光伏浮体阵列的边缘设置小型水流扰动装置，通过轻微扰动打破阵列下方的缓流区，让藤壶这类海洋生物难以附着。

# 04

## 天合光能海上光伏相关可靠性加严测试

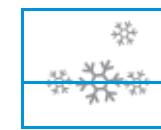
针对海洋环境的特点,光伏组件需在载荷、盐雾、PID、DH等方面具备更优的应对条件,天合光能联合第三方测试机构对组件进行了一系列加严测试。

- 机械载荷:



不均匀雪载

可承受2.8米不均匀雪载



极限低温

-40°C极限低温安全可靠



动载疲劳

+1500Pa @20000次动载循环



冰雹冲击

可承受35mm冰雹冲击

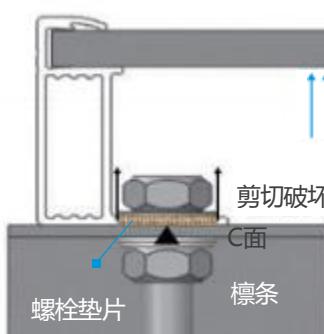


风洞测试

通过17级飓风考验

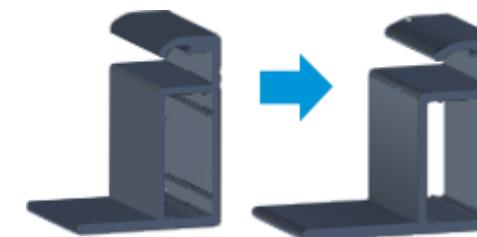
天合光能至尊系列组件通过五项的极限加严载荷测试,在极端季候条件下,仍保持高可靠的载荷性能。

### 强风下组件破坏原理分析:



针对海洋环境大风天气带来的边框撕裂和螺栓松动问题,在以下两方面进行加强:

1)组件边框增加壁厚,减小力臂,选择合适的螺栓垫片,并严格按照用户手册进行安装,保证扭矩



组别	B高度 (mm)	c宽度 (mm)	c厚度 (mm)	c-d距离 (mm)
210-66	33	28.5	1.8	18.1

2)建议采用防松螺栓安装,避免在大风作用下,组件频繁振动带来的扭矩衰减和安装强度下降

方案	原理	图片		震动时间 (S)	残余轴力/初始轴力
金属锁紧螺母	螺纹处过盈配合,增大摩擦力			240	98.00%

### 强风测试及实证

1)高速风洞实验,采用横梁螺丝安装方式,210大尺寸组件可以承受超60m/s的风速

风力等级	12	13	14	15	16	17
名称	飓风	飓风	飓风	飓风	飓风	飓风
风速(m/s)	32.7-36.9	37.0-41.4	41.5-46.1	46.2-50.9	51.0-56.0	56.1-61.2

2)根据《柔性支架应用场景下光伏组件可靠性测试要求》,设计大尺寸组件搭配柔性支架模拟激振实验:振动频率为6Hz、幅度为10mm及20mm、模拟风压1.0KN/m<sup>2</sup>,振动总次数达到230万次的激振测试,振动次数可包络全国80%地区。在230万次模拟激振后,组件未出现明显隐裂现象该组件的铝合金边框未出现裂纹、破损、撕裂等情况,预应力索结构、组件连接件和螺栓完好。

3)浙江嘉兴户外实证基地:2022年经历台风“梅花”登陆,中心风力达到14级,210组件完好无损。

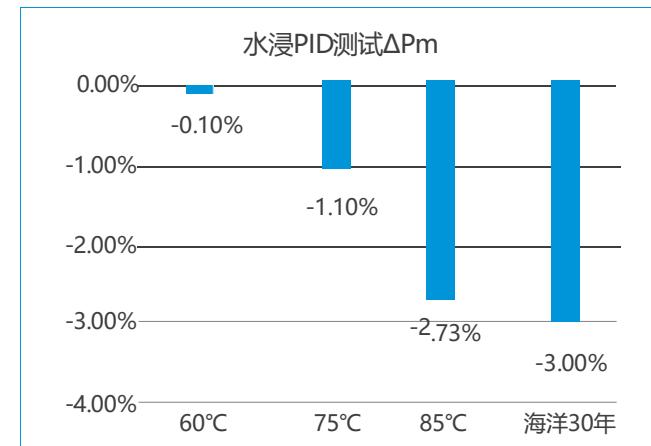


#### ► 高温高湿:

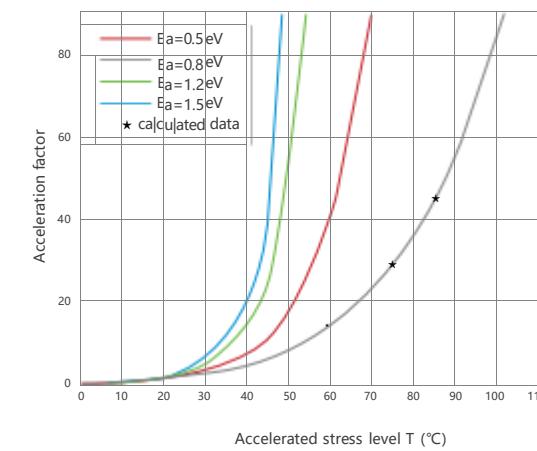
- 1)加严DH测试:至尊双玻组件通过DH3000测试,EL无异常,功率衰减仅1.31%;
- 2)加严PID测试:至尊双玻组件通过湿热水浸PID测试,并通过Arrhenius(阿伦尼乌斯)方程进行修正,在30年海上使用生命周期内衰减在3%以下。



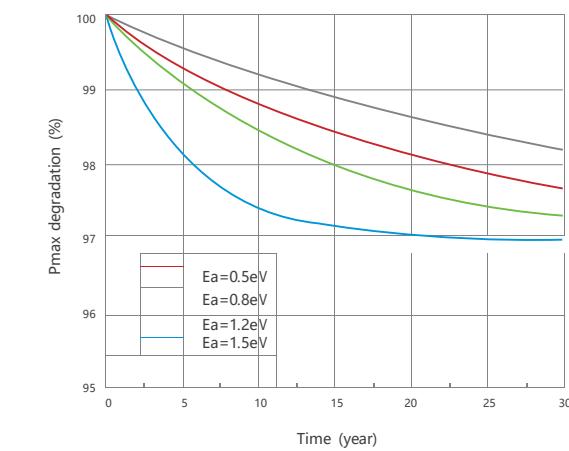
PID测试设备(60°C、75°C、85°C,3.5%盐水浸泡PID)



65°C、75°C、85°C,3.5%盐水浸泡PID功率衰减



$$\text{加速因子模拟AF (TRH)} = \left[ \frac{t_{RH_{\text{试验}}}^n}{t_{RH_{\text{实际}}}^n} \right] e^{P \cdot t \frac{E_a}{K} \left( \frac{T_{\text{实际}}}{T_{\text{试验}}} - \frac{1}{T_{\text{试验}}} \right)}$$



$$P(t;temp;H) = P_0 \cdot \{1 - \exp(-RU \cdot AF(T;RH) \cdot t)\}$$

#### ► 盐雾腐蚀:

为模拟光伏组件耐受沿海腐蚀环境应用能力,国际认证机构采用 IEC61701-2011&IEC 60068-2-52 标准来测试。

Table A.1 - Simplified guidance for determining corrosivity classifications according to ISO 9223 and test methods correlating to one-year corrosivity based on mass loss of steel coupons

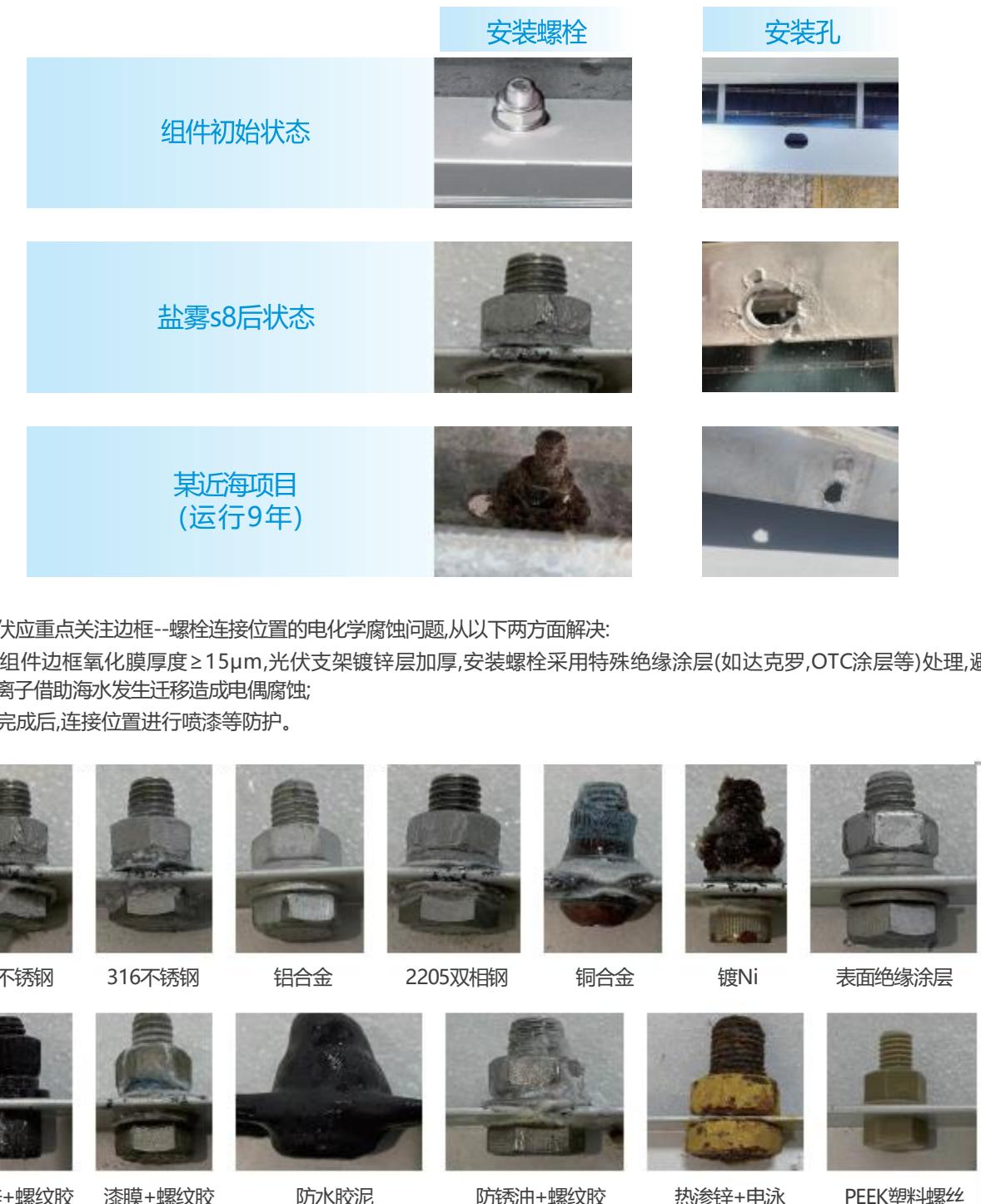
Corrosivity classification of module location	Location characteristics		One-year mass loss range(g/m <sup>2</sup> ) of bare steel coupons	60068-2-52 test method achieving similar one-year corrosivity
	Distance from saltwater(km)	Percentage Time of Wetness (ToW)		
C1 (testing per this document not necessary)	--	--	<10	none
C2 (testing per this document not necessary)	≥10	<25%	10-200	2,3
C3	≥10 2 to 10	≥25% <25%	200-400	4(14 days)
C4	2 to 10 <2	≥25% <25%	400-650	1(28 days) 5(28 days)
C5	<2	≥25%	600-1500	6(56 days)
CX	Offshore	--	1500-5500	7(90 days) 8(70 days)

根据IEC61701-2020光伏PV组件盐雾腐蚀试验,海上环境的腐蚀条件CX可以参照Method7和8的测试方法。  
盐雾测试方法参照下表:

Table 1 - Test cycles for test methods 1 to 8

Test methods	Details of the cycle	Recommended number of cycles
Test method 1	<p>One cycle = 7 days In the case of manual handling, the transition time (max. 2h) should be included in the humid condition period of 6 days and 22 h .</p>	4 cycles (28 days)
Test method 2	<p>One cycle = 1 days In the case of manual handling, the transition time (max. 2h) should be included in the humid condition period of 22 h .</p>	3 cycles (3 days)
Test method 3		1 cycles (7 days)
Test method 4		2 cycles (14 days)
Test method 5	<p>One cycle = 7 days In the case of manual handling, the transition time (max. 2 h) should be included in the humid condition period of 22 hand standard atmosphere period of 3 days.</p>	4 cycles (28 days)
Test method 6		8 cycles (56 days)
Test method 7	<p>One cycle = 8 h The transition times (time allowed to reach the temperature and relative humidity specified for a condition after changing to that condition) are within 30 min or between 30 min and 60 min from salt mist to dry condition, within 15 min or between 15 min and 30 min from dry condition to humid condition and within 30 min from humid condition to salt mist. Those transition times shall be included in next condition period.</p>	3,6,12,30,45,60, 90,150,180 cycles (1,2,4,10,15,20, 30,50,60 days)
Test method 8		
<p>NOTE The <math>\pm</math> tolerances given for temperature and relative humidity are the allowable fluctuations which are defined as the positive and negative deviations from the setting of the sensor at the operational control set point during equilibrium conditions. This does not mean that the set value can vary by plus/minus the amount indicated from the given value.</p>		

为更好地模拟在实际安装情况下的腐蚀情况采用螺丝安装方式进行交变盐雾S8测试,由于铝合金边框、安装螺栓、支架金属活性不同,连接位置易出现电化学反应(牺牲阳极,保护阴极),造成安装孔脆化,安装强度下降,支架也出现不同程度腐蚀。同样,在户外某渔光互补运行8年后,出现了相同的电化学腐蚀问题。



## 05

### 天合光能海上光伏案例

② 烟台中集海上海漂浮实证平台



② 台山海宴100MW近海项目



## 06

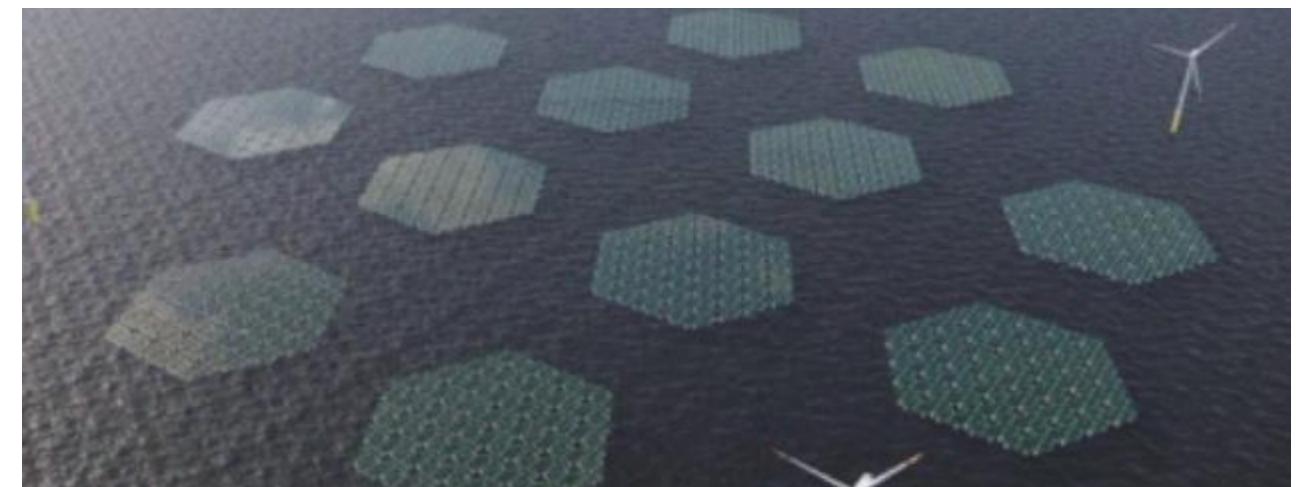
### 海上光伏发展趋势与展望

#### ► 海上光伏的功能化将进一步增强

全球海上光伏快速增长,市场需求增长促进了度电成本进一步降低,成本降低有利于更大规模的普及,形成增长闭环。未来的海上光伏将与水产养殖业、制氢等产业结合,实现价值最大化。漂浮式光伏不需要复杂耗时的基建,有利于项目快速施工,将会成为海上光伏的主流。

#### ► 海上“风光同场”是未来海洋能源的重要发展方向

风光同场的优势:海上漂浮式光伏可以使用海上风电场内闲置的海域空间;海上光伏可与海上风电复用电缆和输电线路设备;风、光从资源角度可以有效实现互补;海上光伏可共享海上风电的桩基基础、提供更便捷的锚泊和安装方式,风光通常可大幅提升资源集约利用度、提高发电场经济效益。



#### ► 海上能源岛

海上能源岛被视为未来海上大规模利用可再生能源的方式,是指在人工建造的大型海上固定式或者漂浮式结构上,集成多种可再生能源利用形式,形成互补式、规模化的发电优势。在海上风光互补的基础上发展多种海上能源集成,复合利用海洋自然资源和海域空间资源,形成优势互补,优化空间配置、提高资源利用效率,推动海洋清洁能源领域的技术融合创新。

#### ► 海上光伏+制氢、制氨

将海上光伏发电就近直接用于制氢、制氨系统,节省输电系统成本。