

# Comparison Analysis of Fixed Support Structures for Offshore Photovoltaic Systems under Wind and Wave Loads

Guixue Liu Zhenjing Wei Zhen Li

State Energy Group Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

## Abstract

At present, fixed offshore PV is widely used in offshore area. In order to improve the stability and economy of the foundation structure, a new type of structure "Suction tube + fixed bracket" is proposed in this paper. Based on this, two pieces and four pieces of structural units were constructed, and then through SACS software, the strength of upper truss structure element under different load direction and leading load is analyzed, which provides reference for practical engineering. The results show that the proposed structural design scheme meets the structural safety requirements and can be applied to practical engineering, and the maximum UC value of the upper truss members increases with the increase of the loading angle, the ice load and the wave load have the greatest influence on the strength of the bottom strut, the bottom of the structure, the connecting rod and the inclined brace, respectively, in engineering application, the installation angle of foundation and the strength of corresponding members can be adjusted according to the load action.

## Keywords

offshore PV; fixed foundation; PV bracket; SACS software; intensity analysis

## 风浪荷载下海上光伏固定式支撑结构对比分析

刘贵学 魏振景 李振

国家能源集团山东电力有限公司, 中国·山东 济南 250000

## 摘要

当前固定式海上光伏在近海区域应用广泛, 为进一步提高基础结构的稳定性和经济性, 论文提出了“吸力筒+固定支架”的新型结构型式。初步设计两种结构方案, 基于此构建单樑、两樑和四樑结构单元, 通过SACS软件, 对上部桁架结构单元在不同荷载作用方向和主导荷载作用下的强度进行分析, 为实际工程提供参考依据。结果表明: 提出的结构设计方案满足结构安全性要求, 可应用于实际工程; 上部桁架杆件最大UC值随荷载作用角度的增加而增大, 冰荷载和波浪荷载分别对光伏板下部支柱、结构底部的通长杆、连接杆和斜撑的强度影响最大, 在工程应用中可以根据荷载作用情况对基础安装角度和相应杆件强度进行调整。

## 关键词

海上光伏; 固定式基础; 光伏支架; SACS软件; 强度分析

## 1 引言

近年来, 在碳达峰、碳中和的政策支撑下, 海上光伏在新能源领域得到了大力发展<sup>[1]</sup>。相比陆地光伏电站, 海上光伏能够充分利用海洋面积和太阳能资源, 有效拓展发展空间, 提高发电效率<sup>[2,3]</sup>。根据适用海域深度的不同, 海上光伏分为漂浮式和固定式两种类型<sup>[4]</sup>, 目前固定式光伏在近海区域发展较为广泛, 面对复杂的海洋环境, 其面临的最大问题是光伏组件结构可靠性<sup>[5]</sup>, 为保证海上光伏项目能够持续稳定运行, 需要对基础结构进行优化设计, 在满足承载力需求的同时提高经济效益, 达到降本增效的目的<sup>[6]</sup>。

当前海上光伏固定式基础结构以“固定桩基+固定支架”为主<sup>[7]</sup>, 而在实际工程中桩基受风浪影响较大。为提高基础强度和承载能力, 论文提出了“吸力筒+固定支架”的新型结构型式, 设计了两种结构方案, 通过 SACS 软件对不同环境荷载情况下的上部桁架结构单元进行强度分析, 为实际工程提供参考依据。

## 2 结构单元设计方案

固定式基础整体结构由多个单元模块通过连接件连接组成, 论文设计两种单樑结构单元方案, 分别是 80m×4m 结构单元(方案一)和 60m×2m 结构单元(方案二), 并在单樑结构的基础上, 分别建立两樑和四樑结构单元模型。

480m×480m 结构单元场地布置示意图见图 1。

【作者简介】刘贵学(1983-), 男, 中国山东菏泽人, 工程师, 从事新能源项目开发研究。

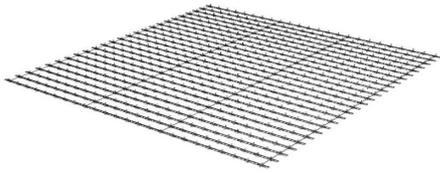


图1 480m × 480m 结构单元场地布置示意图

## 2.1 方案一结构参数

### 2.1.1 单樁结构单元

初步设计 80m × 4m 固定式基础结构单元，共有 8 个筒作为支撑，两端各悬挑出 10m 桁架，纵向单元间隔 20m，如图 2 所示。考虑 480m × 480m 的结构面积，共有  $25 \times 6 = 150$  个单元，每个单元均采用 7 种杆件，不同颜色对应 P1~P7 杆件，见图 3，杆件参数如表 1 所示。

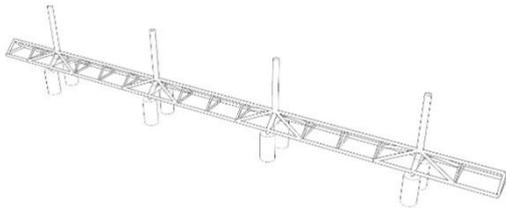


图2 固定式基础单樁结构单元示意图（方案一）

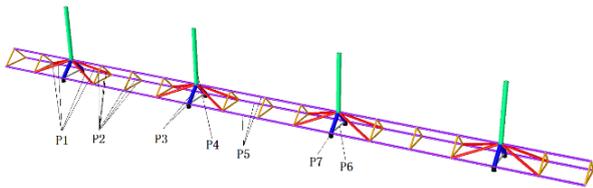


图3 单樁结构单元各杆件示意图（方案一）

表 1 单樁结构单元杆件参数表（方案一）

杆件	直径 (cm)	壁厚 (mm)
P1	30	12
P2	20	5
P3	50	25
P4	55	35
P5	25	12
P6	20	5
P7	55	25

### 2.1.2 两樁结构单元

基于图2所示方案一单樁桁架结构，构建两樁桁架结构，初步设计固定式基础单元为 80m × 4m，共有 16 个筒作为支撑，两端各悬挑出 10m 桁架，纵向单元间隔 20m，两樁之间利用撑杆进行连接形成装配体，两樁上部桁架结构如图 4 所示。

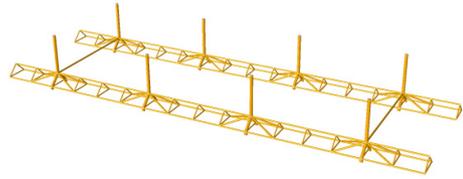


图4 固定式基础两樁结构上部桁架（方案一）

### 2.1.3 四樁结构单元

四樁结构单元装配体由 2 × 2 个单个支架基础组成，初步设计固定式基础单元为 80m × 4m，共有 32 个筒作为支撑，两端各悬挑出 10m 桁架，纵向单元间隔 20m，两樁之间利用撑杆进行连接，模型示意图如图 5 所示。

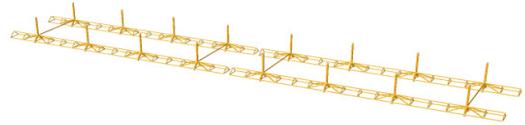


图5 固定式基础四樁结构上部桁架（方案一）

## 2.2 方案二结构参数

初步设计 60m × 2m 固定式基础单元，共有 6 个筒作为支撑，两端各悬挑出 10m 桁架，纵向单元间隔 20m，如图 6 所示。考虑 480m × 480m 的结构面积，共有  $25 \times 8 = 200$  个单元，每个单元均采用 7 种杆件，不同颜色对应 P1~P7 杆件，见图 7，杆件参数如表 2 所示。

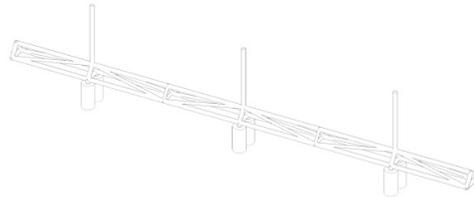


图6 固定式基础单樁结构单元示意图（方案二）

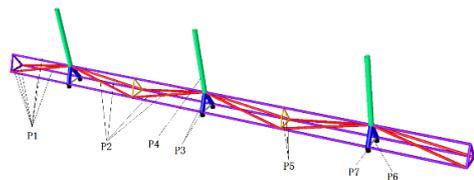


图7 单樁结构单元各杆件示意图（方案二）

表 2 单樁结构单元杆件参数表（方案二）

杆件	直径 (cm)	壁厚 (mm)
P1	26	16
P2	26	15
P3	50	30
P4	55	45
P5	16	10
P6	20	10
P7	50	15

基于图6所示方案二单樁桁架结构，初步设计固定式基础单元为60m×2m，分别构建两樁和四樁桁架结构，分别有12和24个筒作为支撑，其余布置形式和参数同方案一中的两樁和四樁结构设计方案。

### 3 荷载参数

当前中国海上固定式光伏开发的场地以近海为主，考虑到海洋环境的影响，论文分别以波浪荷载和冰荷载为主控荷载，设定荷载作用方向为0°和90°，运用SACS软件，对不同工况下的固定式基础上部桁架结构单元进行静力计算。

#### 3.1 冰荷载

根据《港口工程荷载规范》，冰荷载标准值的相关计算方法如下：

$$F_i = ImkBH\sigma_c \quad (1)$$

式中， $F_i$ 为极限挤压冰力标准值，kN； $I$ 为冰的局部挤压系数； $m$ 为桩、墩迎冰面形状系数； $k$ 为冰和桩、墩之间的接触条件系数； $\beta$ 为桩、墩迎冰面的投影宽度，m； $H$ 为单层平整冰计算冰厚，m； $\sigma_c$ 为冰的单轴抗压强度标准值，kPa。

取50年一遇的海冰力学参数进行计算，根据港口工程荷载规范和相关海域资料，计算得到极限挤压冰力标准值为144.18kN。

#### 3.2 波浪荷载

根据相关海域实测资料，浪向为NE向，频率为25.3%，次常浪向为NNE向，出现频率17.4%，强浪向为NE向。选取最大 $H_{13\%}$ 波高3.83m，谱峰周期11.1s进行计算。

#### 3.3 风荷载及海流作用

根据海域实测资料，选取最大瞬时风速34.8m/s。工程海域海流的50年一遇表层设计流速为1.48m/s，中层设计流速为1.32m/s，底层设计流速为1.20m/s，100年一遇表层设计流速为1.51m/s，中层设计流速为1.36m/s，底层设计流速为1.22m/s。

### 4 结构单元强度分析

论文通过SACS软件，对不同的主导荷载和荷载作用方向下，两种设计方案的固定式基础单樁、两樁和四樁上部桁架结构进行静力计算。其中方案一和方案二都分为两种情况：①冰荷载为主导荷载，即作用荷载包括冰荷载、风荷载和海流作用；②考虑波浪荷载为主导荷载，即作用荷载包括波浪荷载、风荷载和海流作用。所有荷载方向沿0°（X方向）、90°（Y方向）和45°方向，荷载均取1.5倍的放大系数。

#### 4.1 单樁结构强度分析

单樁结构方案一和方案二中杆件对应的最大UC值如表3所示。由表可知，方案一中，在冰荷载主导情况下，三个荷载作用方向的杆件最大UC值出现在光伏板下部的支柱上，即杆件P4，波浪荷载主导情况下，最大UC值主要出

现在支柱下部三角形斜撑和结构底部通长杆处；方案二中，在冰荷载主导情况下，0°、45°作用方向下杆件最大UC值出现在光伏板下部支柱P4处，90°荷载作用方向下的杆件最大UC值出现在杆件P4下部三角形斜撑上，波浪荷载主导的情况下，最大UC值出现在结构底部通长杆和通长杆间的斜撑上。两种方案下，杆件最大UC值随加载角度的增加而增大，每根杆件对应的最大UC值都小于1，满足结构安全性要求。

表3 单樁结构杆件强度计算结果

方案	主导荷载	荷载作用方向	最大UC值	最大UC值发生位置
方案一	冰荷载	0°	0.948	P4
		45°	0.966	P4
		90°	0.965	P4
	波浪荷载	0°	0.195	三角形斜撑
		45°	0.840	三角形斜撑
		90°	0.937	底部通长杆
方案二	冰荷载	0°	0.978	P4
		45°	0.991	P4
		90°	0.995	三角形斜撑
	波浪荷载	0°	0.178	底部通长杆
		45°	0.554	通长杆间斜撑
		90°	0.985	底部通长杆

#### 4.2 两樁结构强度分析

两樁结构方案一和方案二中杆件对应的最大UC值如表4所示。由表可知，方案一中，在冰荷载主导情况下，杆件最大UC值都出现在光伏板下部支柱P4处，波浪荷载主导的情况下，最大UC值出现在支架底部基础连接杆和通长杆间的斜撑处；方案二中，在冰荷载主导情况下，0°和45°荷载作用方向下的杆件最大UC值出现在光伏板下部支柱P4处，90°荷载作用方向下的杆件最大UC值出现在杆件P4下部三角形斜撑上，波浪荷载主导的情况下，最大UC值出现在结构底部通长杆和通长杆间的斜撑上。两种方案下，杆件最大UC值随加载角度的增加而增大，每根杆件对应的最大UC值都小于1，满足结构安全性要求。

#### 4.3 四樁结构强度分析

四樁结构方案一和方案二中杆件对应的最大UC值如表5所示。由表可知，在两个设计方案中，冰荷载主导时，杆件最大UC值都出现在光伏板下部支柱P4处；波浪荷载主导的情况下，0°荷载作用方向下的最大UC值都出现在支架底部基础连接杆处，45°荷载作用方向下的杆件最大UC值都出现在通长杆间的斜撑上，90°荷载作用方向下的杆件最大UC值都出现在支架下部三角形斜撑上。两种方案下，杆件最大UC值随加载角度的增加而增大，每根杆件对应的最大UC值都小于1，满足结构安全性要求。

表 4 两榀结构杆件强度计算结果

方案	主导荷载	荷载作用方向	最大 UC 值	最大 UC 值发生位置
方案一	冰荷载	0°	0.950	P4
		45°	0.964	P4
		90°	0.972	P4
	波浪荷载	0°	0.241	基础连接杆
		45°	0.518	通长杆间斜撑
		90°	0.903	通长杆间斜撑
方案二	冰荷载	0°	0.986	P4
		45°	0.991	P4
		90°	0.994	三角形斜撑
	波浪荷载	0°	0.200	底部通长杆
		45°	0.554	通长杆间斜撑
		90°	0.956	底部通长杆

表 5 四榀结构杆件强度计算结果

方案	主导荷载	荷载作用方向	最大 UC 值	最大 UC 值发生位置
方案一	冰荷载	0°	0.950	P4
		45°	0.964	P4
		90°	0.963	P4
	波浪荷载	0°	0.526	基础连接杆
		45°	0.485	通长杆间斜撑
		90°	0.779	三角形斜撑
方案二	冰荷载	0°	0.983	P4
		45°	0.990	P4
		90°	0.992	P4
	波浪荷载	0°	0.545	基础连接杆
		45°	0.547	通长杆间斜撑
		90°	0.709	三角形斜撑

## 5 结论

论文设计了两种海上光伏固定式支撑结构单元，在此基础上分别构建单榀、两榀和四榀结构，分别设置冰荷载和波浪荷载作为主导荷载，运用 SACS 软件，分析主导荷载、荷载作用方向 and 不同结构设计方案对固定式支撑结构单元强度的影响。具体结论如下：

①两种结构单元设计方案中，单榀、两榀和四榀结构都具有较高的强度和稳定性，满足结构安全性要求，均可应用于实际工程。②随荷载作用角度增加，杆件最大 UC 值增大。在实际工程中可以根据环境荷载作用方向调整结构安装角度，最大程度增强结构稳定性。③冰荷载对光伏板下部支柱的强度影响最大，波浪荷载对结构底部通长杆、基础连接杆和下部斜撑影响最大。在实际工程中可以根据实测海况的环境荷载对相应杆件强度进行调整。

## 参考文献

- [1] 高雄杰,周成龙,张伟,等.海上光伏施工一体化智能装备研究[J].西北水电,2023(5):113-117.
- [2] 徐卫兵,惠星,李东侠,等.桩基固定式海上光伏项目开发建设策略[J].西北水电,2023(5):118-122.
- [3] 王涵宇,王佩明,李艳红,等.水上漂浮式光伏发电系统[J].华电技术,2017,39(3):74-76+80.
- [4] 惠星,穆鹏飞,张艳,等.海上光伏项目的前期开发——以山东省沿海为例[J].西北水电,2023(1):96-101.
- [5] 张亮,朱紫玲,罗冰冰,等.固定式光伏支架可承受荷载有限元分析[J].太阳能学报,2022,43(9):15-20.
- [6] 马月,吕永刚,温友超,等.海上光伏电站基础结构的综述[J].科技与创新,2023(20):92-95.
- [7] 张木梓,王艺澄.全球水上光伏产业的发展现状及市场前景分析[J].太阳能,2020(7):19-24.