

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.014

# 混凝土平屋顶光伏支架及基础优化设计与应用

王潇羽

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京, 100120)

**摘要:** [目的] 由于分布式光伏发电项目平价上网的趋势愈加明显, 对于光伏发电项目各方面的优化设计就显得越来越重要。[方法] 结合山东某屋顶分布式光伏发电项目, 对支架倾角、组件布置方式、支架基础选型等方面进行优化设计, 并通过 PKPM 建模计算, 着重对组件支架不同立柱间距时的材料用量和经济性进行对比分析。[结果] 计算结果表明: 选取混凝土支墩配重基础时, 立柱间距 2.4 m 时的钢材用量比 2.0 m、2.8 m、3.2 m 时分别节约 5.23%、27.5%、37.9%, 总费用分别节约 0.55%、27.5%、37.9%。[结论] 研究表明: 2.4 m 立柱间距时用钢量、混凝土用量以及造价均达到最优。

**关键词:** 混凝土平屋顶; 光伏支架; 结构优化

中图分类号: Tk519; TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0081-05

## Optimization Design and Application on Photovoltaic Support and Foundation of Flat Concrete Roof

WANG Xiaoyu

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

**Abstract:** [Introduction] Due to the tendency of distributed photovoltaic power generation projects becoming more and more popular on the Internet, it is more and more important for the optimal design of various aspects of photovoltaic power generation projects. Based on a rooftop distributed PV power generation project in Shandong Province. [Method] This paper optimized the design of bracket inclination, component arrangement and bracket foundation selection. Through PKPM modeling and calculation, the paper emphasized on material usage and economy. [Result] The results show that when the concrete base weight is 2.4 m, the steel cost is 2.4 m, 2.8 m and 3.2 m, the total cost can be reduced by 0.55%, 27.5% and 37.9%. [Conclusion] We demonstrate that the steel volume, the concrete dosage and the cost are all optimized when the distance between the two columns is 2.4 m.

**Key words:** flat concrete roof; PV support; structure optimization

我国太阳能光伏技术开始于 20 世纪 70 年代, 近些年随着光伏产业不断进步, 平地光伏、山地光伏、渔光互补、风光互补、农光互补、分布式光伏蓬勃发展, 其中屋顶分布式光伏就属于分布式光伏的一种, 近些年也得到了充分发展, 应用实例较多。随着 2013 年 6 月国家能源局发布《分布式光伏发电示范区工作方案》, 光伏发电得以补贴政策的支持, 鼓励分布式光伏项目以“自发自用、余电上网”的模式运营, 分布式光伏发电越来越受到市场

的青睐<sup>[1]</sup>。随着 2017 年国家发改委印发《关于 2018 年光伏发电项目价格政策的通知》, 分布式光伏国家度电补贴下降 5 分, 分布式光伏发电项目平价上网的趋势愈加明显, 对于光伏发电项目各方面的优化设计就显得越来越重要。

国内外学者对屋面光伏组件支架已有一定的研究。章海灿等<sup>[1]</sup>根据已建成的分布式电站屋顶选择与支架结构, 着重介绍了混凝土屋顶和彩钢瓦屋顶的支架结构方案的优缺点。曹麒麟<sup>[2]</sup>分析了光伏电站的特点和固定式光伏支架的设计难点, 并对其优化设计问题展开论述。买发军等<sup>[3]</sup>详细阐述了混凝土屋顶支架强度计算、混凝土基础负

重设计、屋面称重计算的方法。吕宏伟等<sup>[4]</sup>提出4种风荷载取值分析,用不同方法分别计算风压,但是没有做相应的支架有限元分析。杨涛等<sup>[5]</sup>基于Ansys有限元建模对单立柱双轴跟踪支架结构进行静力分析和模态分析,但没有对结构优化做进一步研究。徐东等<sup>[6]</sup>依据青岛地区最大风速计算出的风压对结构进行有限元模型优化,节省一部分材料,但也没有对构件进行优化比选。目前针对光伏组件支架工程量或造价的系统优化设计研究暂时还是空缺。

屋顶分布式光伏发电项目多利用混设项目专业完成情况凝土屋面、彩钢瓦屋面、琉璃瓦屋面等,而其中以混凝土屋面厂房和彩钢瓦屋面居多,本文结合山东某屋顶光伏项目(以下简称山东某项目),基于PKPM主要对混凝土平屋顶固定光伏支架及基础进行了优化设计,通过对比不同支墩间距方案,寻求造价最优的支架设计方案。

## 1 混凝土屋面情况介绍

混凝土屋面分为上人屋面与不上人屋面。两种屋面活荷载要求分别为 $2.0 \text{ kN/m}^2$ 、 $0.5 \text{ kN/m}^2$ ,上人屋面一般能够满足屋面增加光伏发电单元的荷载要求,而不上人屋面则需对原结构进行结构复核。通常情况下原结构设计单位可对混凝土屋面按照 $0.65 \text{ kN/m}^2$ 的新增均布荷载进行结构复核,由此决定原结构是否需要结构加固。以山东某项目为例,项目租用工业厂房屋顶作为建设场地,厂房均为钢筋混凝土框架结构,采用大跨度双T预制板屋面,双T板肋梁与屋面梁连接处焊接。厂房屋面采用2%坡度有组织排水,厂房女儿墙高度 $0.8 \sim 1.5 \text{ m}$ 。

## 2 屋面组件阵列设计思路

### 2.1 组件支架倾角

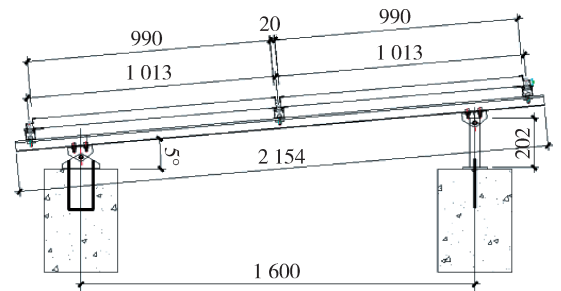
组件支架倾角选择需要综合考虑屋面倾角、太阳能辐射值、布置容量、前后排阵列阴影遮挡等问题,本项目利用PVsyst软件可以计算最佳倾角的取值。如表1所示,倾角在 $29^\circ \sim 30^\circ$ 时,方阵面上捕获的总辐射最大。但屋顶可安装光伏组件的面积是有限的,随着光伏方阵倾角的增加,阵列间距随之增大,可装机容量随之减小。为了在有限的屋顶面积内提高装机容量,可以适当调低倾角。本文秉承

组件容量最大的前提下保证发电量最大的设计思路进行设计。

表1 倾角变化时固定式方阵的年总辐射量

	kWh/m <sup>2</sup>				
倾角	$-6^\circ$	$5^\circ$	$6^\circ$	$27^\circ$	$28^\circ$
面年总辐射量	1 312.0	1 412.5	1 420.3	1 518.1	1 518.8
倾角	$29^\circ$	$30^\circ$	$31^\circ$	$32^\circ$	
面年总辐射量	1 519.2	1 519.2	1 518.9	1 518.3	

考虑在本工程中当光伏方阵倾角为 $5^\circ$ 时(如图1所示),其北侧阴影长度约 $0.5 \text{ m}$ ,刚好可以用作运维通道,最大限度的提高了屋面利用率。



注:尺寸单位为mm。

图1 组件支架剖面图

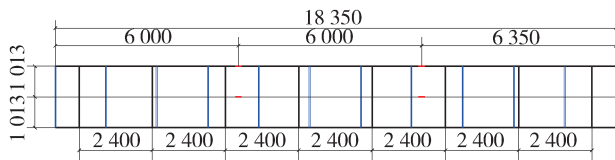
Fig. 1 Component bracket profile

### 2.2 组件支架立柱间距确定

屋顶光伏组件支架基础采用墩基础时,对预制双T板屋顶产生集中荷载,在条件允许的前提下,墩基础布置约均匀,对屋面受力越好,因此尽可能采用小支墩多布置的形式设计。组件支架用钢量中檩条的用量占到绝大部分,对屋顶屋顶光伏更是如此,以本项目为例,檩条占到80%用钢量,而适当减小立柱间距可有效减小檩条尺寸,从而降低造价。本文通过选取不同立柱间距,研究最优立柱间距,从而降低造价。以山东某项目为例,组件横向布置,采用 $2 \times 11$ 阵列(如图2所示), $18.35 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ ,采用 $2.4 \text{ m}$ 、 $2.6 \text{ m}$ 、 $2.8 \text{ m}$ 、 $3.0 \text{ m}$ 五种立柱间距进行计算,从而确定最优支架间距,进而进行优化设计。

### 2.3 组件支架基础选型

组件支架基础分为混凝土支墩配重法、预制混凝土压块法和后锚固化学连接法和结构胶粘剂法<sup>[7]</sup>。(1)支墩配重法即在屋顶浇筑或预制素混凝土或钢筋混凝土支墩,支墩顶面预埋地脚锚栓、



注: 尺寸单位为 mm。

图2 组件阵列布置

Fig. 2 Component array layout

U型螺栓等连接件与光伏支架连接,其优点是基础稳固,结构安全可靠,不破坏屋面防水层,工期短,用钢量较少,缺点是支墩自重较大,原屋面所增荷载较多;预制混凝土压块法即制作钢支架直接放置于屋面上,采用预制混凝土块压在支架底梁上,通过混凝土压块自身重量满足抗倾覆计算,通过压块与屋面之间摩擦力满足抗滑移计算<sup>[8]</sup>,保证结构安全,其优点是节省钢筋、工时,施工简单,不会对原有屋面防水造成破坏,且可有效降低工期,缺点是支架用钢量较大,预制混凝土块容易开裂,耐久性较差,支架与屋面之间无连接,可靠性较差;(2)后锚固化学连接法即屋面光伏支架连为一个整体,钢筋混凝土短柱支墩采用化学植筋(或化学螺栓)与屋面相连,锚固于钢筋混凝土框架柱顶或屋面梁顶,为防止防水层破坏,一般刚性混凝土屋面层会加设钢丝网片<sup>[9]</sup>,化学植筋施工时先凿除屋顶需化学植筋处的屋顶防水层、保温层等面层,露出屋面结构层,化学植筋后再修复屋面面层和防水层,其优点是结构安全可靠,化学植筋连接牢固,原有屋面增加荷载少,光伏支架用钢量较少,较其他几种方式均有显著亮点,但缺点同样也比较明显,如破坏了原有屋面面层尤其是防水层,较难修复且修复后漏水可能性较大,破坏了原屋面防水结构的整体性,且施工技术要求较高,工序繁杂,工期较长;(3)结构胶粘剂法即采用专用建筑结构胶粘剂,将支架立柱或横梁直接粘结于混凝土屋面,设计时需考虑胶粘剂的设计使用年限能够满足屋顶光伏25年的寿命周期,其优点是省时省力,安装过程简单,材料用量小,缺点是国内案例较少,对结构胶粘剂的使用年限要求较高,对其耐久性、可靠性有待考验。

本次选用混凝土支墩配重法,后支墩选用 $\varphi 400$ 圆支墩,高度经计算确定,这样做的优点在

于可使用 $\varphi 400$ 波纹管作为模具直接浇筑,省去方形支墩制作模具的和拆卸的麻烦,大幅度缩短工期。由于支架前立柱上拔力较小,本次前立柱采用 $\varphi 300$ 圆支墩,与后立柱支墩高度一致,全部支墩可节省28%混凝土用量。

### 3 屋面组件支架及基础优化设计计算

光伏组件支架结构材料的选用应结合使用条件、环境、结构的使用年限等因素综合考虑,一般可选铝型材、热镀锌钢材、不锈钢等。连接构件、螺栓螺母等需采用不锈钢、碳钢构件、铝合金等,以确保安装安全可靠<sup>[10]</sup>。在混凝土平屋面的工程情况下,通常选用热镀锌冷弯薄壁型钢作为主构件,采用不锈钢螺栓螺母等连接构件。

本项目光伏组件支架布置形式如图2所示,组件横向布置,采用 $2 \times 11$ 阵列,分别采用2.4 m、2.6 m、2.8 m、3.0 m五种立柱间距进行计算,选取满足计算要求的檩条、斜梁、立柱等构件型材规格,从而对比起经济性。

#### 3.1 计算边界条件

25年重现期风压 $0.38 \text{ kN/m}^2$ ,25年重现期雪压 $0.31 \text{ kN/m}^2$ <sup>[11]</sup>。风荷载体形系数 $1.3$ <sup>[12]</sup>。

抗震设防烈度:7度,设计地震分组:第二组。地震动峰值加速度: $0.15 \text{ g}$ ;建筑场地类别:Ⅲ类<sup>[13]</sup>。

恒载:钢材密度: $\rho = 78.5 \text{ kN/m}^3$ ;光伏组件的规格为: $1650 \text{ mm} \times 990 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ;每块电池板的自重: $G = 18.5 \text{ kg} \times 10 \text{ N/kg} = 185 \text{ N}$ 。

风荷载:根据光伏支架设计要求,可由风速和公式(1)《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),计算出风荷载标准值:

$$W_k = \beta_z \mu_s \mu_z W_0 \quad (1)$$

式中: $\beta_z$ 取1.0; $\mu_s$ 取1.3; $\mu_z$ 取1.0。

雪荷载:根据光伏支架设计要求和公式(2)《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)可计算出雪荷载标准值:

$$S_k = \mu_r S_0 \quad (2)$$

式中: $\mu_r$ 取1.0。

#### 3.2 设计荷载取值

以立柱间距为2.0 m时为例,设计荷载如下:

1)中檩条设计荷载

恒载: $F_c = 0.185 \div 1.65 \div 2 \times 2 = 0.112 \text{ (kN} \cdot$

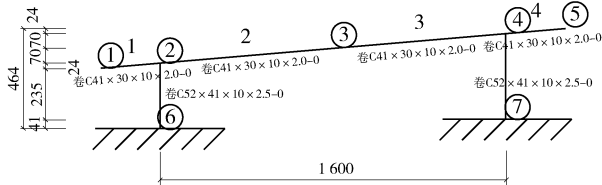
$\text{m}^{-1}$ )。

雪荷载:  $F_s = 0.31 \times 0.992 = 0.308 (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

风荷载:  $F_w = 1.3 \times 0.38 \times 0.992 = 0.245 (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

## 2) 支架设计荷载

支架计算模型如图3所示:



注: 尺寸单位为 mm。

图3 计算模型

Fig. 3 Calculate the model

经计算, 立柱间距为 2.0 m 时, 檩条选择 U41 × 30 × 10 × 2.0。

因此作用于斜梁中点和边点的恒载分别为:

$$F_c = (0.112 + 0.017) \times 2 = 0.26 (\text{kN})。$$

$$F_c = (0.112 \div 2 + 0.017) \times 2 = 0.15 (\text{kN})。$$

作用于斜梁中点和边点的雪荷载分别为:

$$F_s = 0.308 \times 2 = 0.616 (\text{kN})。$$

$$F_s = 0.308 (\text{kN})。$$

作用于斜梁中点和边点的风荷载分别为:

$$F_w = \pm 0.245 \times 2 = 0.49 (\text{kN})。$$

$$F_w = \pm 0.245 = 0.245 (\text{kN})。$$

## 3) 支架基础设计要求

计算支架基础上拔力时, 支架及组件自重对基础为有利荷载, 恒载组合值系数取 1.0, 雪荷载为有利荷载, 雪荷载荷载分项系数取 0。

计算基础抗倾覆时, 根据《地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[14]</sup>, 抗倾覆稳定性应满足。

基础设计还应验算水平风荷载作用下支墩与屋面之间摩擦力需满足抗滑移计算, 根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[14]</sup>, 抗滑移应满足。

## 3.3 计算结果

经 PKPM 建模计算, 分别采用 2.4 m、2.6 m、2.8 m、3.0 m 五种立柱间距进行计算, 得出主要结果如表 2 所示。

表2 组件支架及基础选型参数

Tab. 2 Component bracket and basic selection parameters

柱距/m	檩条选型	斜梁选型	支墩高度/m
2.0	U41 × 30 × 10 × 2.0	C41 × 30 × 10 × 2.0	0.410
2.4	U41 × 41 × 10 × 2.0	U41 × 41 × 10 × 2.0	0.487
2.8	U41 × 41 × 10 × 3.0	U41 × 41 × 10 × 2.3	0.570
3.2	U52 × 41 × 10 × 3.0	U41 × 41 × 10 × 2.5	0.650

注: 以构件最大应力比达到约 0.8 为准; 前立柱采用三角构件链接, 后立柱统一采用 C52 × 41 × 10 × 2.5 型材。

对比 1 MW 容量所需材料量及费用(如表 3 和图 4 所示), 计算结果表明, 立柱间距 2.4 m 时的钢材用量比 2.0 m、2.8 m、3.2 m 时分别节约 5.23%、27.5%、37.9%。立柱间距 2.4 m 时的总费用比 2.0 m、2.8 m、3.2 m 时分别节约 0.55%、27.5%、37.9%。立柱间距 2.4 m 时的总费用比 2.0 m、2.8 m、3.2 m 时分别节约 0.55%、27.5%、37.9%。当立柱间距为 2.4 m 时, 用钢量最省, 混凝土用量虽无明显降低, 但也用量最小, 且组件支架及支墩的总费用最低。常规山地光伏一般采用 2.8 ~ 3.2 m 立柱间距, 而计算表明对于屋顶光伏支架, 当采用混凝土支墩配重法时, 立柱间距适当减小, 不仅可以有效均摊支墩重量, 对屋面受力有利, 又可以有效减小用钢量, 从而大幅降低造价。而对于本项目 2.4 m 的立柱间距则为最优结果。

表3 经济比选(1 MW 容量材料量及费用)

Tab. 3 Economic comparison (1 MW capacity material volume and cost)

柱距/m	用钢量/t	混凝土用/m <sup>3</sup>	造价/万元
2.0	26.578	126.385	28.846
2.4	26.851	120.100	28.687
2.8	36.500	123.000	36.580
3.2	40.422	120.215	39.550

注: 采用 290 Wp 组件。

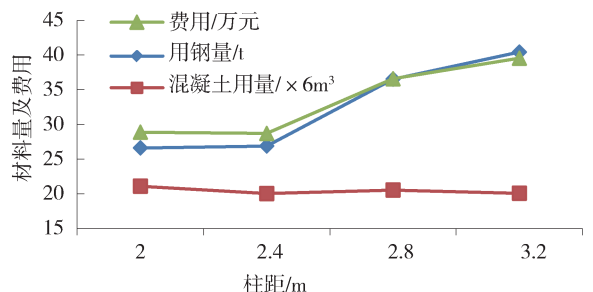


图4 经济比选结果

Fig. 4 Economic comparison results



## 4 结论

1) 当采用混凝土支墩配重法时, 立柱间距适当减小, 不仅可以有效均摊支墩重量, 对屋面受力有利, 又可以有效减小用钢量, 从而大幅降低造价。而对于本项目 2.4 m 的立柱间距则为最优结果。对比 1 MW 容量所需费用, 立柱间距 2.4 m 时的总费用比 2.0 m、2.8 m、3.2 m 时分别节约 0.55%、27.5%、37.9%。

2) 本文基于山东某项目实例, 对光伏支架及基础进行多方位优化: 采用光伏方阵倾角为 5°, 其北侧阴影长度约 0.5 m, 刚好可以用作运维通道, 最大限度的提高了屋面利用率; 采用前立柱  $\varphi 300$  圆支墩、后立柱  $\varphi 400$  圆支墩的形式, 相交全部支墩可节省 28% 混凝土用量; 通过计算光伏支架不同立柱间距并对比材料用量和工程造价, 表明适当降低立柱间距可有效降低工程造价。

3) 混凝土平屋面屋顶分布式光伏支架基础方案较多, 应根据实际情况和具体工程特点(屋面可利用空地分布情况、荷载承受情况、项目工期、材料用量等), 经方案比选, 寻求适合于本项目的结构形式, 尽可能满足安全、适用、耐久的要求, 同时尽可能的降低造价和缩短工期。

### 参考文献:

- [1] 章海灿, 杨松, 沈道军, 等. 分布式光伏电站的屋面选择与支架结构方案研究 [J]. 太阳能, 2016(3): 60-63 +55.  
ZHANG H C, YANG S, SHEN D J, et al. Study on roof selection and bracket structure scheme of distributed photovoltaic plant [J]. Solar energy, 2016(3): 60-63 +55.
- [2] 山海建, 蒋侃锁. 固定式光伏支架设计 [J]. 黑龙江科技信息, 2011(19): 25.  
SHAN H J, JIANG K S. Fixed photovoltaic bracket design [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(19): 25.
- [3] 买发军, 潘甲龙, 白荣丽. 混凝土平屋面光伏支架强度及屋面承重计算 [J]. 太阳能, 2016(4): 63-65.  
MAI F J, PAN J L, BAI R L. Calculation of strength and roof load-bearing capacity of photovoltaic roof supports for concrete flat roof [J]. Solar energy, 2016(4): 63-65.
- [4] 吕宏伟, 李新忠. 太阳能光伏支架结构风载取值分析 [J]. 西北水电, 2012(5): 85-87.  
LÜ H W, LI X Z. Analysis of wind load value of solar photovoltaic support structure [J]. Northwest Hydropower, 2012(5): 85-87.
- [5] 杨涛, 范久臣, 刘荣辉, 等. 基于有限元法的太阳能光伏支架结构设计与优化 [J]. 吉林化工学院学报, 2016, 33(3):

39-44.

YANG T, FAN J C, LIU R H, et al. Design and optimization of solar photovoltaic bracket based on finite element method [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2016, 33(3): 39-44.

- [6] 徐东, 张洪信, 高雷, 等. 青岛市太阳能光伏电站及其支架设计 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2016, 31(2): 59-64.  
XU D, ZHANG H X, GAO L, et al. Qingdao solar photovoltaic power station and its support design [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2016, 31(2): 59-64.
- [7] 孙海燕. 某混凝土屋面分布式光伏电站基础方案分析与计算 [J]. 中国新技术新产品, 2015(7): 158-159.  
SUN H Y. Analysis and calculation of foundation scheme of a concrete roof distributed photovoltaic plant [J]. China New Technology Products, 2015(7): 158-159.
- [8] 祁建洲. 混凝土平屋面光伏组件支架的连接设计 [J]. 门窗, 2012(5): 219-220.  
QI J Z. Connection design of concrete flat roof PV module support [J]. Doors and Windows, 2012(5): 219-220.
- [9] 奚勇, 李智勇. 地震区多层钢结构住宅设计例析 [J]. 建筑, 2012(9): 67 +69.  
XI Y, LI Z Y. Case analysis of multi-storey steel structure residential area design in earthquake area [J]. Building, 2012(9): 67 +69.
- [10] 王雨, 谢炜. 谈屋顶光伏设计及安装 [J]. 山西建筑, 2017, 43(2): 196-198.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 光伏发电站设计规范: GB 50797—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 混凝土结构设计规范(2015版): GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

### 作者简介:



WANG X Y

王潇羽(通信作者)

1991-，男，山西大同人，工程师，硕士，主要从事光伏、风电相关工作(email) wangxiaoyu@ncpe.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)