

光伏组件柔性支架技术方案

龙源（北京）太阳能技术有限公司 ■ 王雨

摘要：介绍了针对条件较差地区的光伏组件柔性支架的方案，并对该支架的关键技术点提出合理建议。

关键词：光伏组件；柔性支架；大跨度；钢绞线；应力

0 引言

目前，光伏地面电站建设地点多在荒漠、戈壁，以及一些条件相对较好的屋顶、山地、渔塘、滩涂等地方；而坡度起伏较大、植被较高的山地，地质条件较差的滩涂，水位深、跨度大的渔塘，以及一些大型污水处理厂等地方，由于受限于传统支架安装方式的要求而不能被充分利用。因此，改变传统支架的安装方式，充分利用地形条件较差而光资源较好的山地、渔塘等地方，是推动光伏产业健康快速发展的有效途径。

1 技术原理及方案设计

1.1 技术原理

柔性支架采用两固定点之间张拉预应力钢绞线的方式，两固定点采用刚性基础提供反力，可实现10~30 m大间距。这种设计可规避山地起伏、植被较高等不利因素，仅在合适的部位设置基础点并张拉预应力钢绞线；同时在水深较深的渔塘也可以在保持水位不动的条件下，实现基础及柔性支架的施工。

设计中，钢绞线作为组件安装的固定支架，计算时需考虑自重，以及风压、雪压不同荷载组

合下的工况，并进行受力分析。区别于传统支架的刚性变形要求的严格限制（主梁为 $L/250$ ，次梁为 $L/200^{[1]}$ ），柔性支架对变形没有严格限制，目前可根据实际情况采用挠度容许值 $L/30 \sim L/15$ ，在这种变形条件下不影响钢绞线的力学性能，因此，柔性支架可以更好地适应大跨度方案，同时可控制好总造价。

1.2 基础设计方案

柔性支架方案是把传统刚性支架方案的檩条改为钢绞线的方式，其特点是钢绞线采用先线法提供预拉力，组件安装后在不同工况受力条件下允许钢绞线有一定的变形（本文按挠度容许值 $L/30$ 论述），从而实现10~30 m的大跨度支架，可满足不同地形的需要。由于钢绞线张拉预应力的存在，柱顶均会产生较大的水平拉力，导致基础底部弯矩较大，因此一般设计采用在柱顶用斜拉或支撑的方案平衡预拉力产生的水平力，以满足柱底抗倾覆的受力要求。

根据柔性支架的整体设计方案及受力特点，基础形式可采用图1、图2两种形式。

1) 基础方案1：采用两个基础，一个是钢立柱基础，主要提供柔性支架竖向力的反力；另需

收稿日期：2017-07-26

通信作者：王雨（1980—），男，一级注册结构工程师，主要从事太阳能光伏电站设计方面的工作。wy061019@163.com

配备一个斜拉索基础,承担钢绞线产生的水平力,并承担向上的拉力及向右的拉力,斜拉索基础属于配重式。

2) 基础方案 2: 采用两个基础,一个是钢立柱基础,主要提供柔性支架竖向力的反力;另需配备斜撑柱基础,承担钢绞线产生的拉力,且钢绞线对斜撑柱基础产生向下压力及向右的推力。斜撑柱基础底面积相对基础方案 1 略小。

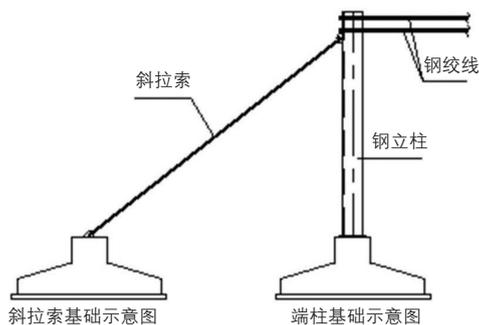


图 1 基础方案 1

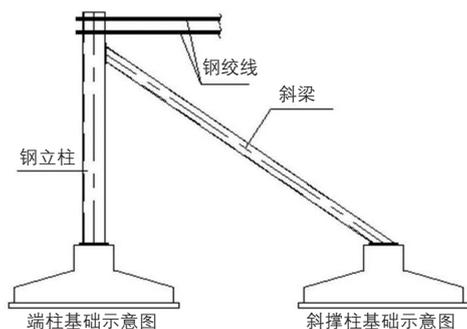


图 2 基础方案 2

1.3 支架设计方案

根据光伏组件的排布方式,柔性支架方案可分为横排和竖排两种(见图 3、图 4);根据跨长可采用单跨和多跨的方案,但因场地条件限制,单跨往往不能满足需要,则需要采用二跨、三跨,甚至更多,中间支座可采用摇摆柱方式有效控制钢绞线的挠度。

支架与端柱及中间柱的连接均要求采用铰接固定方式,以减小应力集中;同时钢绞线张拉安装方便,便于缩短工期、节省造价。

1.4 支架适用范围分析

由于柔性支架具有跨度大且跨度范围灵活可

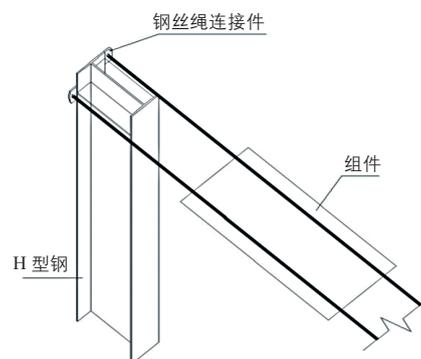


图 3 组件横排方案

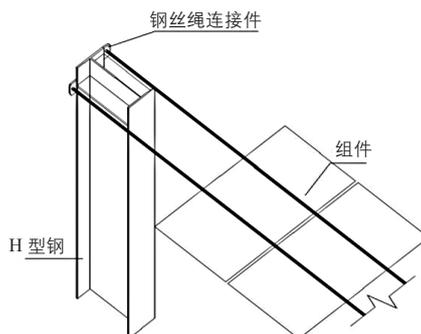


图 4 组件竖排方案

调的优势,因此其适用范围更广,包括:

1) 适用山地坡度、起伏较大的地区,同时不受植被高低等因素的影响;

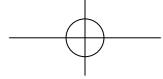
2) 适用于鱼塘、滩涂等地区,突破传统支架受限于水深、区域大小等条件,通过柔性支架 10~30 m 的大跨度方案优势,以及中间可另设支撑柱等方案,解决鱼塘、滩涂等地区传统支架无法施工及安装的难点;

3) 适用于污水厂水池顶部,因污水厂水处理工艺的要求,大体积水池内部无法安装支架基础,柔性支架可巧妙规避这一难点,使污水厂水池建设光伏电站成为可能。

2 柔性支架关键技术点

2.1 研究内容及方法

光伏组件柔性支架系统是一种新型的支撑体系,通过将光伏组件固定在张紧于两柱间的钢绞线上的方式来简化组件支架系统。这是一种新型结构,在行业规范与标准中没有充足的设计依据;且该系统利用张紧的钢绞线的轴向拉力抵



抗组件重力、雪荷载和风荷载等横向荷载，属于几何非线性受力体系，受力与变形特征复杂。

为了合理设计柔性支架系统，保证其在不同工况下能够安全服役，同时也为其后续设计优化提供支撑，有必要研究不同工况下支架系统的受力与变形规律。

受力计算时可采用理论分析与数值模拟两种方法，两种方法互相验证、互相补充。

2.2 风荷载标准值计算公式^[2]

柔性支架的设计需考虑自重、风压、雪压不同荷载组合下的工况受力。

对于主要受力结构，垂直于建筑物表面上的风荷载标准值 w_k 为：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中， β_z 为高度 z 处的风振系数； μ_s 为风荷载体型系数； μ_z 为风压高度变化系数； w_0 为基本风压。

对公式中的参数取值重点说明：

1) 计算基本风压时，因空气密度越大，风压也越大，为安全起见，取 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的空气密度值，即 1.396 kg/m^3 ($20\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 1.205 kg/m^3)。

2) 风压高度变化系数应按实际高度考虑，如组件高度为 10 m 情况下，根据 GB 5009-2012《建筑结构荷载规范》，A 类的风压高度变化系数为 1.28，B 类为 1.00，C 类为 0.65，D 类为 0.51。

3) 风振系数：组件为风敏感结构，应考虑风压脉动对结构产生风振的影响。如组件高度为

10 m 时，根据 GB 5009-2012《建筑结构荷载规范》，则不同地面粗糙度时的风振系数分别为：A 类 1.60、B 类 1.70、C 类 2.05、D 类 2.40。

4) 风荷载体型系数是指风作用在构筑物表面一定面积范围内所引起的平均压力（或吸力）与来流风的速度压的比值，它主要与构筑物的体型和尺度有关，也与周围环境和地面粗糙度有关。

2.3 荷载组合

根据柔性支架安全情况，荷载组合可分为仅考虑结构自重、考虑自重与雪荷载共同作用、考虑自重与风荷载共同作用下的 3 种情况。这 3 种受力情况下荷载计算与组合形式不同，受力分析时，对不同的荷载效应进行组合，形成不同工况。

同时，环境温度的变化会导致钢绞线膨胀或收缩，从而造成预应力的变化，并引起钢绞线位移增大或缩小。因此，一方面应保证在温度上升达到设计最高值时，钢绞线位移仍然满足刚度条件；另一方面保证在温度降低到最低值时，钢绞线应力不超限。

2.4 张拉工序^[3]

1) 应先张拉前（下）钢绞线，后张拉后（上）钢绞线。张拉后钢绞线时对前钢绞线的影响较小，而张拉前钢绞线会造成后钢绞线较多的应力损失。

2) 若将前钢绞线预应力直接张拉至期望值，则由于后钢绞线未张紧，端柱会产生较大扭矩，发生扭转变形。这不仅威胁结构安全，同时会造

表 1 不同工况下的荷载系数

		仅自重	自重 + 雪荷载	自重 + 风荷载	
				迎面来风	背面来风
自重	分项系数	1.20	1.20	1.20	1.00
	使用年限调整系数	—	—	—	—
雪荷载	分项系数	—	1.40	—	—
	使用年限调整系数	—	0.95	—	—
	组合值系数	—	1.00	—	—
风荷载	分项系数	—	—	1.40	1.40
	使用年限调整系数	—	—	0.95	0.95
	组合值系数	—	—	1.00	1.00

成前钢绞线连接处在张拉过程中位移增大,影响预应力控制精度。为了避免端柱截面产生较大扭矩,可进行多遍张拉。例如,第1遍张拉将前钢绞线预应力张拉至0.2倍预应力,再将后钢绞线张拉至0.2倍预应力;第2遍张拉前钢绞线至0.4倍预应力,再将后钢绞线张拉至0.4倍预应力;如此循环直到达到期望预应力值。

3)若摇摆柱对钢绞线轴向变形无约束,钢绞线可单边张拉;若摇摆柱约束钢绞线轴向位移,钢绞线应左右对称张拉,以避免张拉过程造成摇摆柱侧向受力。

2.5 方案设计建议

1)因短跨度方案与长跨度方案相同条件下所需要的钢绞线预应力相同,对端柱及中柱的作用力相同,因此设计中除根据实际情况考虑跨度外,优先选择长跨度方案。

2)中柱为摇摆柱时,计算表明摇摆柱与钢绞线在迎面来风时侧向转运明显,与钢绞线组成几何可变体系,不稳定,因此应从构造上从中柱顶端提供有效水平力,避免中柱抗弯受力。

3)计算表明,钢绞线直接锚固于柱体上时,钢绞线在柱体连接处弯曲变形明显,钢绞线与端柱相接处应设为铰接,避免钢绞线局部弯曲过大,强度失效。

3 地面电站采用柔性支架与普通支架对比

3.1 适用范围对比

表2为柔性支架与普通支架适用范围的对比。

3.2 施工安装及检修维护

3.2.1 施工安装

采用柔性支架的光伏电站与常规地面光伏电站的施工不同。1)柔性支架基础一般采用混凝土独立基础,立柱采用焊接H型钢柱,独立基础与钢柱均比常规地面支架的基础及立柱要大很多。2)受柔性支架跨度较大且离地高度较高的影响,一般采用安全绳悬挂施工人员进行安装的方

表2 柔性支架与普通支架适用范围对比

支架形式 地区分类	常规支架	可调支架	柔性支架
荒漠、戈壁	√	√	○
滩涂、鱼塘	○	○	√
污水厂	×	×	√
平缓地形山地	○	×	√
复杂地形山地	×	×	√
混凝土屋顶	√	×	○
彩钢板屋顶	√	×	×

说明:√表示优先采用;○表示可以采用;×表示不应采用。相比地面施工方式增加了施工难度及不安全因素。3)钢绞线的张拉技术含量较大,需要专业的施工单位才可以完成。

3.2.2 检修维护

采用柔性支架的光伏电站检修及维护相对常规地面电站难度要大。常规地面电站常采用风吹或水洗的方式,而因柔性支架离地高度较高,因此一般只能采用水冲的方式;同时,对出现质量问题的组件,更换难度也偏大。因此,在组件采购时应严格质量检测及管理,避免后期因质量原因产生的组件更换。

4 结束语

我国光伏发电项目柔性支架尚处于探索阶段,实际案例为数不多,已建成项目以污水处理厂为主,尚未出现用于山地、水塘、鱼塘等地的柔性支架。由于目前西北地区荒漠、戈壁用地紧张,在条件良好的山地越来越少的局面下,传统支架的适用局限性越来越严重,而柔性支架具有跨度大且跨度范围灵活可调的优势,在光伏产业发展的道路上更具有推动意义。

参考文献

- [1] GB 50797-2012,光伏发电设计规范[S].
- [2] GB 5009-2012,建筑结构荷载规范[S].
- [3] GB/T 5224-2014,预应力混凝土用钢绞线[S]. 太阳能