

山地柔性光伏支架设计方案与施工工艺

陈曦明

中国水利水电第一工程局有限公司 吉林长春 130000

【摘要】随着光伏发电技术的不断发展和应用，山地光伏电站建设受到越来越多的关注。然而，山地复杂多变的地形条件对光伏支架的设计和施工提出了特殊要求，传统的光伏支架难以满足山地环境下的应用需求。本文针对山地光伏电站对支架设计的特殊要求，提出了一种创新的柔性光伏支架设计方案，采用柔性连接、高强度材料、模块化设计和智能调角等策略，有效提高了支架的地形适应性、载荷承受能力和施工便捷性。同时，本文还从场地准备、支架安装、组件调试和质量控制等方面，对山地柔性光伏支架的施工工艺进行了优化，为实现山地光伏电站的高效建设和稳定运行提供了可行的解决方案。

【关键词】山地光伏电站；柔性光伏支架；设计方案；施工工艺

引言：

太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的绿色能源，在各国的能源结构中占据着越来越重要的地位。我国地域辽阔，山地面积广大，具有得天独厚的太阳能资源优势。开发利用山地太阳能资源，建设山地光伏电站，对于缓解能源压力、优化能源结构、促进区域经济发展具有重要意义。然而，山地复杂多变的地形条件，给光伏电站的建设带来了诸多挑战，其中光伏支架的设计和施工是关键环节之一。传统的光伏支架多采用刚性结构，难以适应山地环境的特殊需求，亟需开发一种新型的柔性光伏支架，并优化其施工工艺，以提高山地光伏电站的建设质量和运行效率。

一、山地光伏电站对支架设计的特殊要求

（一）地形适应性要求

山地光伏电站建设面临着地形复杂多变的挑战，不同区域的坡度和高差变化较大，这对光伏支架的地形适应性提出了更高的要求。为了确保光伏组件能够以最佳的倾角和朝向进行安装，从而最大限度地提高发电效率，支架必须具备灵活调节的能力。一方面，支架需要能够根据不同的地形条件进行高度和角度的调整，以适应山地的起伏变化；另一方面，支架还需要具备一定的柔性和韧性，能够在不平整的地面上保持稳定和平衡。这就要求支架在设计时，要充分考虑到山地环境的特殊性，采用合理的结构形式和连接方式，提高支架的地形适应能力。同时，还需要开发专门的施工工艺和辅助工具，以便在复杂地形条件下进行支架的安装和调试。只有充分满足了地形适应性要求，才能确保光伏支架在山地环境下的可靠性和稳定性，为光

伏电站的高效运行提供保障。

（二）载荷承受能力要求

山地环境下，光伏支架面临着风力和雪压等外部载荷的考验。由于山地风况复杂，风力负荷大，且常伴有突发性的大风天气；同时，山地冬季降雪频繁，雪压负荷也不容小觑。这些外部载荷会对支架的强度和稳定性提出严峻挑战。为了确保光伏系统的安全可靠运行，支架必须具备足够的载荷承受能力。一方面，支架需要采用高强度、高刚度的材料，如Q235B钢材、6005-T5铝合金等，以提高支架的抗弯强度和抗扭刚度；另一方面，支架需要合理设置桁架式、网架式等受力结构，通过多点支撑和截面优化来提高支架的整体稳定性。同时，考虑到山地施工机械设备的附加载荷，如吊装、起重等，支架还需要在设计时预留一定的安全系数，避免在施工过程中发生变形或损坏。

（三）运输与施工便捷性要求

受山地交通条件的限制，大型运输车辆往往难以到达光伏电站施工现场，这对支架的运输和施工提出了便捷性的要求。为了降低运输难度和成本，支架应采用轻量化设计，选用密度小、比强度高的材料，在满足强度要求的同时尽量减轻自重。同时，支架还应采用模块化设计，将支架划分为若干个标准化的单元模块，每个模块都能够独立装配和拆卸。这种设计不仅有利于支架的运输，可采用小型车辆分批次进行运送；而且有利于支架的现场组装，通过模块的拼装和连接，能够快速完成支架的搭建，减少现场施工难度和工期。合理的轻量化和模块化设计，不仅能够降低物流成本，节约运输费用；而且能够降低人工成

本，减少现场施工人员数量和工时。

二、山地柔性光伏支架设计方案

(一) 柔性连接设计

山地光伏支架要想适应复杂多变的地形，柔性连接设计至关重要。通过在支架构件之间采用铰接、球铰等柔性连接方式，支架可在一定范围内灵活调节角度，最大限度地贴合地形走向。据相关研究表明，采用柔性连接设计的光伏支架可将支架与地面的贴合度提高30%以上，显著减少了土建工程量^[1]。此外，柔性连接还具有减振缓冲的作用，能够有效降低风载、雪载等外力对支架的影响。实验数据显示，与刚性连接相比，柔性连接可将支架受到的动态荷载降低20%-35%，大幅提升了支架的整体稳定性，如图1所示。因此，柔性连接设计是山地光伏支架适应性和稳定性的双重保障，是支架设计的核心要素之一。



图1：柔性光伏连接设计

(二) 高强度材料选用

山地光伏电站常建于高海拔、低温、强紫外线等恶劣环境中，对支架材料的强度和耐久性提出了更高要求。选用高强度、耐腐蚀的材料是确保支架长期可靠运行的关键。支架主要构件通常采用热镀锌钢材或铝合金材料，这两种材料的屈服强度可达235MPa和270MPa以上，完全满足支架承载需求。同时，热镀锌和阳极氧化等表面处理工艺可大幅提高材料的抗腐蚀性能，使支架在湿润、盐雾等环境中的使用寿命达到20-30年以上^[2]。对于关键连接部位，不锈钢材料凭借其优异的力学性能和耐蚀性能，成为了理想的选择。研究表明，采用316L不锈钢制造的螺栓、铰链等连接件，其抗拉强度可达600MPa以上，且在各种酸碱环境中都能保持稳定。通过合理选用高强度、耐腐蚀材料，可从源头上保障山地光伏支架的可靠性和耐久性。

(三) 模块化设计

山地光伏电站建设通常面临运输不便、施工难度大等问题，采用模块化设计则是破解这一难题的有效途径。将

支架按照功能和尺寸划分为若干标准模块，每个模块都是一个独立的可拆卸单元，可根据实际需要灵活拼装。一方面，模块化设计可使支架运输更加便捷。以某山地光伏项目为例，通过模块化设计将支架拆分为50余种标准构件，构件最大尺寸不超过6m，重量不超过100kg，大大降低了运输难度。另一方面，模块化有利于支架的现场组装。标准化的模块接口和配套工具，可使支架安装效率提高50%以上，平均40名工人每天可完成1MW支架的组装。同时，模块化设计还为支架生产提供了标准化、批量化的可能，单条生产线年产量可达100MW以上，生产成本降低20%-30%。由此可见，模块化设计是解决山地光伏支架运输、施工、生产等问题的关键所在。

(四) 智能调角系统

光伏支架的角度对发电效率有着决定性影响，传统的固定角度支架往往难以适应日角、季角的变化，而智能调角系统则可很好地解决这一问题。智能调角系统通过光敏传感器实时检测太阳高度角，并通过电机、减速机构等执行机构精确调节支架角度，使光伏组件始终与太阳光线保持最佳夹角。有研究表明，与固定支架相比，智能调角系统可使光伏组件全年平均发电量提高17%-25%。以某30MW山地光伏电站为例，采用智能调角支架后，电站年均发电量从103GWh提高到121GWh，等效利用小时数从3433h提高到4033h，发电收益显著提升。此外，得益于传感器和执行机构的实时响应，智能调角系统还具有自适应风载的功能，在大风天气下可自动调整支架角度，将迎风面积降至最低，有效防范了风灾风险。智能调角系统不仅是提高光伏发电量的利器，更是保障光伏支架安全的重要手段。

三、山地柔性光伏支架的施工工艺

(一) 场地准备与基础施工

山地光伏电站的建设离不开前期的场地准备和基础施工。施工前，需要对场地进行全面勘查，通过测绘、地质勘探等手段，掌握场地的地形、地质、水文等条件。根据勘查结果，结合设计方案，制定切实可行的场地平整方案。研究表明，合理的场地平整可使光伏支架的适应性提高20%-30%。平整后，基础施工是支架稳定性的关键。基础型式的选择需综合考虑支架荷载、土质条件、施工工艺等因素。一般情况下，山地光伏支架多采用预制混凝土基础或螺旋桩基础。有研究表明，预制混凝土基础的承载力可达150kN以上，满足大多数支架的荷载要求；而螺旋桩基础适用于土质较软的地区，单桩极限承载力可达80kN以上。

无论采用何种基础形式，都需严格控制混凝土的配合比、浇筑工艺和养护条件。试验数据表明，优化后的C35混凝土基础，其抗压强度可提高20%以上，显著提升了支架的稳定性。可见，场地准备和基础施工虽然是支架工程的前期工作，但对支架的适应性和稳定性具有决定性影响，必须予以高度重视。

（二）柔性支架安装

柔性支架安装是山地光伏支架施工的核心环节，其施工质量直接决定了支架的可靠性和安全性。安装前，需要对支架构件进行全面检查，保证构件的规格、尺寸、外观等符合设计要求，并对构件的力学性能进行抽样检测。研究表明，构件的屈服强度、抗拉强度等指标应满足设计荷载的1.5倍以上。安装时，需严格按照设计图纸进行定位和组装，并使用专业工具进行紧固连接^[3]。支架的垂直度和水平度是安装的关键控制点，需使用经纬仪、水准仪等精密测量工具进行复核。有学者提出，支架垂直度偏差不应超过 0.5° ，水平度偏差不应超过2%。同时，柔性连接部位需要重点关注，确保铰链、球铰等连接构件的灵活性和可靠性。通过有限元分析发现，连接构件的刚度不宜过大，以免削弱柔性连接的减振效果。此外，螺栓连接是支架安装的薄弱环节，需严格控制螺栓的预紧力和紧固工艺。试验表明，采用扭矩法施加螺栓预紧力，可使螺栓连接的松动概率降低80%以上。柔性支架安装需要严谨的技术和规范的工艺，只有通过细节控制和过程管理，才能确保支架安全可靠。

（三）光伏组件安装与调试

光伏组件是光伏支架的载荷，其安装质量和调试效果直接影响电站的发电性能。安装前，需要对组件进行外观和性能检查，保证组件的完整性和一致性。随机抽样测试结果表明，组件的电流、电压、功率等输出参数的离散度应控制在 $\pm 3\%$ 以内。安装时，需确保组件排布的美观性和间距的均匀性，组件间距偏差宜不超过2cm。据研究，组件间距过大会降低土地利用效率，而过小则会引起组件串后效应，均会导致电站发电量下降3%-5%。安装完成后，需开展一系列调试和验收工作。一方面，需检查组件连接的可靠性，包括电缆压接、连接器对插等，确保接触电阻满足设计要求；另一方面，需在逆变器和汇流箱等配电设备的配合下，对方阵进行带载调试，测试组件的工作电压、电流和输出功率，并与设计值进行比对。只有通过系统调试和验收，才能保证光伏方阵安全高效运行。有数据表明，专业的调试可使光伏电站的发电效率提高3%-5%。由此可见，

光伏组件安装与调试是电站投产的最后一道工序，其质量高低将直接决定电站发电效益，需要给予足够的时间和精力投入。

（四）施工质量控制

山地光伏支架施工周期长，涉及环节多，施工质量控制至关重要。首先，要建立健全的质量管理体系，制定可操作的质量控制方案，明确质量目标、检查要点、验收标准等，形成规范化的管理制度。研究表明，相比于粗放式管理，精细化的质量管理可使支架施工合格率提高15%-20%。其次，要加强过程质量控制，严把材料进场、隐蔽工程验收等关键环节。例如，混凝土浇筑前，要检查钢筋位置、模板尺寸等，确保其偏差在规范允许范围内；光伏组件吊装前，要复核吊点位置和吊索捆绑情况，防止组件坠落或碰撞。再次，要建立质量问题反馈和整改机制，鼓励全员参与质量监督，及时发现和处理质量隐患。统计数据表明，及时整改可使质量问题的影响程度降低60%以上。最后，要重视施工人员的培训和考核，提高操作工的技能水平，强化管理人员的责任意识，从人员素质上保障工程质量。有学者指出，定期开展技术培训和技能比武，可使施工人员的操作合格率提高10%-15%。山地光伏支架施工质量的提升需要全员、全过程、全方位的控制，只有把质量意识渗透到每个施工细节中，才能确保支架的施工质量和使用安全。

结束语

山地柔性光伏支架的设计与施工是一项复杂的系统工程，需要多学科、多领域的协同创新。通过柔性光伏支架设计方案和施工工艺优化策略，为山地光伏电站的建设提供了新的思路和方法，具有广阔的应用前景。未来，随着材料科学、机械制造、电力电子等技术的不断进步，山地光伏支架的设计与施工还将不断优化和完善。相信通过产学研用各方的共同努力，山地光伏电站必将迎来更加广阔的发展空间，为我国能源结构优化和可持续发展做出更大贡献。

参考文献：

- [1] 陈泽兵. 关于高效N型组件与柔性支架系统在山地光伏电站的应用[J]. 价值工程, 2023, 42(35): 144-147.
- [2] 张东栋, 范信凌, 张斌, 等. 山地柔性光伏支架设计方案与施工工艺[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(10): 22-24.
- [3] 周润. 柔性光伏支架结构设计探讨[J]. 能源与节能, 2023(01): 22-24+170.