

复杂山地地形下光伏支架基础施工技术与稳定性控制研究

李 岩

国家电投工程公司（山东院） 山东济南 205200

摘要：随着世界对清洁能源的需求不断攀升，太阳能光伏发电作为清洁能源，受到了极大的关注。本文深入探讨复杂山地地形光伏支架基础施工技术及稳定性控制。分析了山地光伏项目的现状，阐述了目前山地光伏所面临的问题。详尽论述了适合山地的各类光伏支架基础施工技术，桩基础，锚杆基础等等，并对这些施工技术的工艺和要点展开探究，而且，从结构设计，材料选取，防风抗震举措等角度给出全面的稳定性把控策略，此研究结果对于提升山地光伏项目创建品质，削减成本，保证长久稳定运行有着十分关键的引导价值，给推进山地太阳能资源有效利用给予了技术支撑。

关键词：山地光伏支架；基础施工技术；稳定性控制策略

在全球能源转型的大形势里，太阳能光伏发电属于一种清洁的，可再生的能源，在能源领域中逐步占据重要的位置。近几年，光伏产业迅猛发展，有关山地光伏项目的研究慢慢增多，不过在基础施工技术和稳定控制方面还有一些急需解决的问题，不同山地地区的地质，地形状况差别很大，目前的施工技术和控制策略很难符合各种复杂情况的要求，而且，施工过程中环境保护和生态修复问题也越来越受到重视，所以，要探寻并改良适合复杂山地地形的光伏支架基础施工技术和稳定控制办法，从而推动山地光伏产业朝着可持续方向发展。

1. 复杂山地地形下光伏项目现状

1.1 复杂山地地形带来的挑战

1.1.1 地形复杂

山地地形最突出的特点就是地势起伏很大，坡度经常发生改变，而且还有许多沟壑，岩石之类的特殊地形，这种地形条件下，光伏支架的布置和安装就变得非常困难，传统意义上的光伏支架系统一般适用于比较平坦的地面，但是在山地环境下，就需要按照地形的不同而做出相应的调整，比如在坡度很大的地方，要设计特别的倾斜支架，这样才能保证光伏板能接收到充足的阳光，在沟壑地带，则要用跨越结构或者特殊的地基形式来支撑支架，地形的复杂化也加大了施工设备和材料运输的难度，往往得专门开辟施工便道，有时候还得用人力或者小车去搬运，这既浪费时间又耗费人力，而且有可能给周围环境带来破坏^[1]。

1.1.2 地质条件复杂

山地地区地质情况比较复杂，岩石和土壤种类多，地质构造也不稳定，有些山区有断层、滑坡、泥石流之类的地质灾害隐患，这些地质情况给光伏支架基础的设计和施工带来更高要求，基础得有足够的承载力和稳定性，才能抵挡地质改变和自然灾害带来的影响，比如在岩石地质的地方，基础施工要用特殊的钻孔、锚固办法；在土壤松软或者有滑坡危险的地区，就要用加固、排水等手段保障基础稳定，地质情况的不确定使基础施工有更多风险和花费，基础要是出了问题，修起来难而且贵。

1.1.3 气候条件恶劣

山地地区的气候条件一般要比平原地区更糟糕，气温波动幅度很大，昼夜温差能达到十几摄氏度甚至更多，极端的气温条件会给光伏支架和基础材料带来热胀冷缩的影响，长时间作用下来，可能会使材料发生变形，出现裂缝，从而缩短支架和基础的使用寿命。山地地区的风力负荷比较大，特别是处在山顶，峡谷之类风口的地方，强劲的风势会对光伏支架施加极大的压力，甚至致使支架倒塌，而且，有些山地地区也许会频繁遭遇暴雨，暴雪之类的极端天气情况，暴雨有可能引发洪水，泥石流，进而对基础实施冲刷和破坏，暴雪还会加大光伏支架的积雪负荷，影响其稳定状况，所以在开展山地光伏项目的设计和施工时，务必全面考量气候条件给支架和基础带来的影响，要采取相应的防护手段^[2]。

1.1.4 施工难度大

由于地形、地质与气候条件较为复杂，山地光伏项目

的施工难度比平原地区要高出许多，在施工期间会遇到很多技术难题，高精度的支架定位问题、复杂的基础建设问题以及恶劣环境中材料运输与设备操作等等，施工人员必须具备丰富经验及专业知识才能保证施工质量与安全。山地光伏项目其施工场地分布比较分散且作业面狭小，使得大型施工设备难以展开利用，这也会让施工变得更为困难，并带来更高成本上的挑战，而且还要考虑到如何对周边生态加以保护，在施工时防止造成水土流失或者植被被破坏等情况发生^[3]。

1.2 山地光伏项目发展趋势

随着各国对清洁能源需求的持续增加，山地光伏项目的不断发展，在过去这几年中，很多国家和区域均加大了对山地太阳能资源开发的力度，在国内，我国西部地区存在着大量的山地且太阳能资源很充裕，因此该区域就变成了山地光伏项目的主要发展方向，通过统计可知，山地光伏装机量每年都在逐步提升，预估未来几内仍将会维持较高增率情况。在国外则有类似地形特征较多的瑞士及奥地利这类国家积极推行建设山地光伏项目，其依靠自身先进技术以及成熟操作经验在这片区域上已收获较为突出成就成果。

2. 光伏支架基础施工技术

2.1 桩基础施工技术

2.1.1 灌注桩

灌注桩属于一种很常见的桩基础形式，在山地光伏项目当中使用得比较多，它的施工原理就是先在地基上钻个孔，然后再把钢筋笼放进去，最后往孔里灌注混凝土就形成了桩。灌注桩有一个优点就是可以适应各种各样的复杂地质状况，特别是遇到岩石地层的时候，借助专门的钻孔设备就可以轻松成孔，灌注桩所具备的承载力比较大，按照设计需求来调节桩的粗细程度以及长短，从而符合光伏支架对基础承载能力的要求。山地施工时，灌注桩施工要注意几点，山地地形起伏，钻孔前要精确测量平整场地，保证钻机稳定。根据不同的地质条件，选择适合的钻孔工艺和钻头，在岩石地层用冲击钻或旋挖钻，在土层用螺旋钻等，在灌注混凝土时，保证混凝土质量，灌注连续，防止出现断桩等问题。比如某山地光伏项目中使用了直径为 800mm 的灌注桩做光伏支架基础，该区域地质情况较为复杂，上部土层较厚，下部是硬岩，施工时旋挖钻机钻过土层后使用冲击钻在岩石里钻孔，钢筋笼制作严格按照设计要求进行，钢筋笼强度和垂直度得到保证，混凝土用商品混凝土，导管灌注，保证桩体完

整和强度，经检测，灌注桩承载力达到设计要求，为光伏支架的稳定安装提供保障^[4]。

2.1.2 预制桩

预制桩是在工厂或者现场提前做好桩体，之后再用锤击或者静压等方式把它打进地基里的一种桩基础类型，预制桩有着施工速度快，质量比较好掌握的优点，常用的预制桩包括钢筋混凝土预制桩和预应力混凝土预制桩，钢筋混凝土预制桩的制作工艺比较简单，而且成本也相对较低，而预应力混凝土预制桩强度比较高，抗裂性能也不错，适合用在对基础要求比较高的地方。山地环境里，预制桩施工的难点是运输与打桩，山地地形复杂，道路状况不佳，所以预制桩运输要选用专门的运输设备和办法，保证桩体在运输途中不会受损，打桩的时候，要依照地形和地质情况来挑选合适的打桩设备和工艺，在坡度大的地方，可以使用履带式打桩机，这样可以提升设备的稳定性，在软土地层中，静压法打桩比较合适，能减小对周围土体的干扰^[5]。例如在另外一个山地光伏项目中，选择预应力混凝土预制桩做支架基础，项目场地比较狭窄，大部分是软土地质，施工单位采用分段预制桩，把预制桩运到现场之后再拼接起来，打桩的时候用静压桩机，精准控制压力和桩的垂直度，顺利把预制桩打进地基，这种方法既加快了施工速度，又保证了基础的质量和稳固性。

2.2 锚杆基础施工技术

2.2.1 普通锚杆基础

普通锚杆基础是把锚杆锚固到稳固的岩体或者土体里，依靠锚杆同土体间的摩擦力赋予抗拔力，以此支撑起光伏支架的一种基础形式，锚杆基础有着施工简单，花费少，给周围环境带来的影响比较小这些优点，适合地质状况良好，土体或者岩体比较稳定的山区。普通锚杆基础的施工流程大致涵盖钻孔、清孔、插入锚杆以及灌注锚固剂这些环节，钻孔的时候，按照设计需求来决定钻孔的具体位置、角度和深度，清孔的作用是清除掉孔内那些岩屑，泥土之类的杂质，这样做可以保障锚固剂和岩体或者土体之间有良好的粘合效果，把锚杆插入之后，马上执行灌注锚固剂这个操作，而且要让锚固剂充盈整个钻孔，从而产生有效的锚固力量。在某山地光伏项目中采用普通锚杆基础，该山体为砂岩，岩体较完整，稳定性较好，施工人员采用手持式钻机钻孔，钻孔直径为 40mm，钻孔深度为 2m，钻孔完成后采用高压空气清孔，将直径为 25mm 的钢筋锚杆插入孔内，灌注高强度水泥砂浆作

为锚固剂，通过现场拉拔试验，验证锚杆基础抗拔力满足设计要求，可以支撑光伏支架。

2.2.2 预应力锚杆基础

预应力锚杆基础是在普通锚杆基础上，给锚杆加上预应力，使其在承受荷载之前就处于受拉状态，从而提高锚杆基础的抗拔能力和稳定性，适用于对基础稳定性要求较高的山地光伏项目，如在强风、地震等自然灾害多发地区的项目。预应力锚杆基础的施工工艺比较复杂，除了普通锚杆基础的施工步骤之外，还要增加预应力的施加与锁定过程，在施加预应力的时候，要用到专门的张拉设备，依照设计所规定的预应力数值来实施张拉，然后用锁定装置把锚杆固定在预先设定好的预应力状况当中。比如在一处处于山区风口地带的光伏项目里，为了抵御强风给光伏支架带来的影响，便采用了预应力锚杆基础，施工的时候，先依照普通锚杆基础的施工流程开展钻孔，清孔，插入锚杆以及灌注锚固剂等操作，等到锚固剂到达设计强度之后，再用穿心式千斤顶对锚杆执行张拉，施加 100kN 的预应力，而且还要通过锚具把锚杆固定起来，经过长时间的观测，预应力锚杆基础在强风环境下仍然稳固不动摇，从而保证了光伏支架的安全运行。

2.3 独立基础施工技术

2.3.1 混凝土独立基础

混凝土独立基础是常见的基础形式，由一个混凝土基础块组成，每个基础块支撑一个光伏支架立柱。混凝土独立基础结构简单、施工方便、承载力大，适合在地形相对平坦、地质条件较好的山地区域使用。混凝土独立基础的施工流程包含基础定位放线、土方挖掘、模板搭建、钢筋绑扎以及混凝土浇筑这些环节，在基础定位放线的时候，按照光伏支架的布置图来精确确定基础所在的位置，土方挖掘的时候，要留意控制挖掘的深度和坡度，防止出现超挖或者欠挖的现象，模板搭建务必结实稳固，保证混凝土浇筑的时候不会发生变形或者漏浆的情况，钢筋绑扎要依照设计的要求来进行，保证钢筋的间距，数量以及锚固的长度，混凝土浇筑的时候，要分层敲打，保证混凝土的密实度。某山地光伏项目部分平坦区域，采用混凝土独立基础，施工人员使用全站仪进行基础定位放线，再用小型挖掘机进行土方开挖，模板使用钢模板，支模后进行钢筋绑扎，混凝土由搅拌站集中供应，混凝土泵车运输至浇筑点，浇筑后及时进行养护，保证混凝土强度正常增长，检测发现，混凝土独立基础各项指标均满足设计要求，为光伏支架的安装提供了支撑。

2.3.2 钢结构独立基础

钢结构独立基础是用钢结构构件形成的基础形式，其优点是重量轻，安装方便，可以重复使用，在山地光伏项目中，当需要快速安装或者对基础重量有特殊要求时，钢结构独立基础是比较好的选择。钢结构独立基础一般包含基础框架、地脚螺栓等部分。基础框架一般用钢材焊接或者螺栓连接而成，可以按照设计需求进行定制。地脚螺栓用来把光伏支架立柱和基础框架连接起来，在施工的时候先把基础框架装好，之后再利用调节地脚螺栓的螺母来调整基础的水平度和高度。

比如，在某个山地光伏项目中的紧急抢修工程里，因为时间很紧，所以选用了钢结构独立基础，施工人员把事先制作好的钢结构基础框架运到现场，然后用吊车来装设，装设的时候，用水准仪和经纬仪去量测并调节基础框架的水平度和垂直度，保证它符合设计的要求，之后再把光伏支架立柱通过地脚螺栓跟基础框架连起来固定好，整个施工过程非常迅速，很快就完成了光伏支架的修复和安装任务，光伏发电系统也得以恢复正常运作。

结束语：综上所述所，在全球能源转型及“双碳”目标的推动下，山地太阳能资源开发成为光伏产业发展的新方向，但复杂山地地形导致光伏支架基础施工存在地形复杂、地质条件差、气候多变、施工困难等众多问题，这些问题严重影响着山地光伏项目的建设质量、成本控制以及长期稳定运行，所以深入探讨复杂山地地形条件下光伏支架基础施工技术和稳定性控制策略有着重要的理论意义和现实意义。

参考文献：

- [1] 马波 . 光伏发电项目固定支架微孔灌注桩基础施工技术综述 [J]. 价值工程 ,2024,43(25):159–161.
- [2] 冯发明 . 光伏工程中支架灌注桩基础施工研究 [J]. 低碳世界 ,2024,14(06):40–42.
- [3] 潘帅 , 徐涛 , 唐小钧 . 戈壁光伏工程中的支架灌注桩基础施工技术 [J]. 四川建材 ,2023,49(11):68–70.
- [4] 武飞 , 光伏支架基础施工用套筒及施工方法 . 甘肃省 , 甘肃省安装建设集团有限公司 ,2023-08-01.
- [5] 王岷 . 山地光伏支架基础施工异常情况处理 [J]. 水利水电快报 ,2022,43(S2):55–58.

作者简介：姓名：李岩（1988-10），性别：男，民族：汉，籍贯：山东省济南市，学历：研究生，职称：工程师，研究方向：土建施工技术研究、电力建设项目管理。