

DOI: 10.61369/NPS.2025010004

大坡度复杂山地光伏支架微孔灌注桩基础设计应用

张甲元

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550000)

Discussion on the Foundation Design of Microporous Pouring Piles in Large Slope Mountain Double-Column Photovoltaic Support

ZHANG Jiayuan

(POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited., Guiyang Guizhou 550000)

摘要:【目的】针对中国光伏发电发展因土地资源紧张,特别是受“三区三线”等严格用地政策限制以及大坡度限制区域难以利用的问题。【方法】基于云南某光伏项目的实际情况,在机械难以进入的大坡度复杂山地,施工采用人工操作俗称“小蜜蜂”的小型凿岩潜孔钻,成孔设置了桩径 185 mm、桩长 1.45 m 的微孔灌注桩作为基础。同时,支架结构创新采用“2×5”双立柱布置形式,显著提升了其对复杂地形的适应能力和整体稳定性。在施工过程中,严格参照国家相关规范标准,并通过专业软件 3D3S 对支架基础承载力进行了精确计算和分析。【结果】计算表明基础承载力完全满足要求(最大上拔力 7 kN < 设计抗拔承载力 25.19 kN; 最大水平力 8 kN < 设计水平承载力 12.41 kN; 最大竖向力 23 kN < 设计竖向承载力 95.90 kN), 施工质量可控(孔心位移偏差 < 10 mm, 垂直度偏差 < 0.5%)。【结论】研究表明,针对大坡度复杂山地采用双立柱光伏支架结合人工成孔的微孔灌注桩基础,是一种有效可行的解决方案,为具有相似地形地质条件的复杂山地光伏项目开发提供了技术参考和实践经验。

关键词: 光伏发电; 支架基础; 大坡度复杂山地; 微孔灌注桩; 大坡度复杂山地

ABSTRACT: [Introduction] In view of the shortage of land resources in the development of photovoltaic power generation in China, especially the strict land use policy restrictions such as ‘three districts and three lines’ and the difficulty in using traditional restricted areas with terrain slopes. [Method] Based on the actual situation of a photovoltaic project in Yunnan Province, a small rock-drilling down-the-hole drill commonly known as ‘Little Bee’ is used in the construction of large-slope complex mountains where machinery is difficult to enter. The micro-hole cast-in-place pile with a pile diameter of 185 mm and a pile length of 1.45 m is set as the foundation. At the same time, the support structure innovation adopts the ‘2×5’ double column arrangement form, which significantly

improves its adaptability to complex terrain and overall stability. In the construction process, the bearing capacity of the support foundation is accurately calculated and analyzed by referring to the relevant national standards and professional software 3D3S. [Result] The calculation shows that the bearing capacity of the foundation fully meets the requirements (the maximum uplift force is 7 kN < the design uplift bearing capacity is 25.19 kN; the maximum horizontal force is 8 kN < the design horizontal bearing capacity of 12.41 kN; the maximum vertical force is 23 kN < the design vertical bearing capacity is 95.90 kN), and the construction quality is controllable (hole center displacement deviation < 10 mm, verticality deviation < 0.5%). [Conclusion] The research shows that it is an effective and feasible solution to use double-column photovoltaic support combined with artificial pore-forming microporous cast-in-place pile foundation for complex mountainous areas with large slope. It provides technical reference and practical experience for the development of complex mountainous photovoltaic projects with similar topographic and geological conditions.

KEY WORDS: photovoltaic power generation; scaffold base; large slope complex mountain; microporous cast-in-place pile; large slope complex mountain

引言

工业革命以来,化石能源的大量开采与使用,导致全球 CO₂ 气体排放量不断增加、温室效应增强、气候变暖,世界能源战略和供需格局进入调整变革期,正历经美国黑色“页岩油气革命”和中国风、光、氢、储绿色“新能源革命”,^[1-5]加速全球能源转型。全球能源绿色转型从化石能源的“不可能三角”发展到以新能源为主构建新型能源体系的“可实现三角”,进而再到独立目标下能源革命

的“可持续三角”。^[6-8]

为减少 CO₂ 排放，我国在 2020 年联合国大会上宣布了“双碳”（2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和）目标，^[9] 实现“碳达峰、碳中和”目标是一次深刻而广泛的社会变革，^[10-11] 是发展新质生产力的具体体现。“双碳”目标下能源转型将引导未来我国产业结构的大规模调整，包括大力发展低碳制造业以及推动第二产业行业排放的标准化管理等。^[12-13] 根据国家能源局的数据，^[14] 到 2024 年底，我国累计发电装机容量约达 32.3 亿 kW，同比增长 14.4%。其中，光伏发电装机容量约 8.2 亿 kW，同比增长 46.7%，为进一步提高新能源消纳能力，国家通过优化电力系统调节能力建设，计划支撑 2025—2027 年每年新增 2 亿 kW 以上的新能源合理消纳利用，新能源利用率 ≥90%。^[15]

随着全球经济快速发展，能源需求不断增长，化石能源有限性和污染问题加剧，促使人们加快开发可再生能源。太阳能发电利用半导体的光生伏特现象将光能转化为电能，是利用太阳能最清洁且最直接的方式之一，^[16-17] 太阳能作为一种可再生能源，具备资源丰富、可持续利用和无污染等优势。太阳能光伏发电行业的技术进步、成本下降使其推广快速，^[18] 乡村振兴等国家战略政策的全面展开实施，进一步促进提升了乡村光伏发电系统装机容量，^[19] 推动电气化、数智化、清洁化成为乡村能源系统优化升级的重要方向，^[20] 加之储能技术与太阳能发电的融合，配电网可以更加灵活调控电力输出功率，^[21] 中国在能源清洁化转型和“双碳”目标背景下，已建成一批以太阳能、风能等新能源为主的能源基地，^[22] 太阳能发电行业 2024 年已经取得了显著的进步，正经历前所未有的发展机遇，并在全球能源结构中扮演着日益重要的角色。

中国绿色能源用地空间分布不均，土地利用存在生态环境问题突出、违法用地突出、地类管理不一致等现象。^[1] 随着光伏装机容量的不断增加，光伏发电阵列区用地已逐渐成为制约光伏发电投资的核心因素之一。国家“十四五”规划以来，限制使用的土地类型或附加使用条件越来越多，光伏发电阵列区用地势必遭遇土地资源供给紧张的瓶颈。

光伏发电产业当前正面临土地资源供给紧缺的难题，依据国家发展改革委能源研究所的研析，我国能源电力需求正稳步上升，到 2030 年，光伏发电和风力发电装机容量总规模将在现有基础上实现

翻倍增长，达到 24 亿 kW。

为突破光伏发电项目土地资源供给紧张的瓶颈，提高光伏发电阵列区已征用土地的利用率尤为重要。行业调查数据显示，当前山地光伏项目实际开发土地面积占比约 45%，而地形坡度 > 35° 的复杂陡坡及岩质区域开发利用率不足 5%（基本未利用），造成征用土地浪费的同时也加大了光伏发电项目的投资。^[23]

在山地光伏发电系统工程实践中，支架基础体系作为关键性技术环节，其设计优化与实施质量对整体结构完整性保障、造价成本控制及施工效率提升具有系统性制约作用，^[24] 故选择采用合适的支架基础型式至关重要。光伏支架基础是连接和固定光伏支架系统立柱的关键载体，^[25] 承担着将立柱系统荷载向持力层传递的核心功能。在光伏阵列支架基础型式中，灌注桩基础是一种常见的基础型式，通过在地面钻孔后浇筑钢筋混凝土（或混凝土）形成的桩结构，为光伏支架系统提供承重支撑。然而，对于地形坡度 > 35° 的复杂山地光伏发电项目，地形起伏大、高差明显、地质条件复杂（可能存在强风化岩层、松散堆积层等）、易水土流失、生态环境脆弱、施工机械可达性差等特点，给灌注桩基础设计和施工实施带来一定的困难。^[26]

1 工程概况

某光伏发电项目位于云南省玉溪市新平县境内，直流侧总装机容量 269 MWp（交流侧 200 MW），场地海拔高程 600 m ~ 1 400 m。项目地年太阳总辐射量为 6 209.3 MJ/（m²·a），资源等级为很丰富，25 年年平均利用小时数为 1 462.9 h。场址内地层主要第四系地层残坡积（Q4el+dl）粉质黏土，侏罗系（J）强~弱风化砂岩、泥岩组成，其物理力学性质均较好，可满足天然地基设计要求，场地地震动峰值加速度为 0.15 g。

本项目建设内容主要包括光伏场区、35 kV 集电线路工程、220 kV 升压站等。光伏场区采用分块发电，集中并网方案，分为 7 个地块建设，共设 65 个光伏发电单元。光伏区采用 575 Wp 双面单玻单晶硅组件。光伏支架采用固定支架结构，单个光伏组串组件采用纵向 2 排横向 14 列的“2×14”布置方式，固定倾角 26°，光伏板最低点距离地面高度 2.5 m。

项目用地范围内存在多处超 35° 的大坡度

复杂山地，沟壑较多，坡向朝南，光照条件好，（见图1）当地环水保相关政策要求不允许在光伏阵列区超 35° 的大坡度复杂山地区域大范围开挖施工台阶，施工机械可达性差，无法正常机械成孔施工，如果不利用此区域，需要额外征地约 $5.33 \times 10^5 \text{ m}^2$ （800亩），否则无法达到预期的装机容量，影响项目发电收益。如何利用此区域，且方便现场施工，提高项目已征用土地利用效率，成为光伏阵列支架基础结构设计的难题。

本项目结合地形地质条件、施工条件、风压等设计参数确定对地形坡度超过 35° 的大坡度复杂山地采用双立柱光伏支架（10根桩）微孔灌注桩基础，不开挖施工台阶，采用小型凿岩潜孔（俗称“小蜜蜂”）人工成孔。

2 大坡度复杂山地条件和设计要求

2.1 地质条件

设计应用区地形地貌整体上属低中山缓坡地貌，总体地形北高、南低，地形起伏相对较大，属新征用地，现状为灌木林地。光伏阵列区土层自上往下依次为耕植土、强风化泥岩。



图1 坡度超过 35° 的大坡度复杂山地现状地形地貌图

Fig.1 Topographic map of large slope complex mountainous area with terrain slope more than 35°

①层耕植土：土层出露厚 $0.10 \text{ m} \sim 0.30 \text{ m}$ ，厚度较小，在施工时可考虑挖穿或清除，对拟建场地影响小。

②层强风化泥岩：土层出露厚 $8.50 \text{ m} \sim 10.30 \text{ m}$ ，遇水、暴晒容易软化、崩解，抗风化能力差，对基槽开挖（钻孔）边坡稳定性不利，基槽开挖（钻孔）后应及时浇筑基础或采取其他措施防止风化发展、降低承载力等，影响结构稳定性。

耕植土、强风化泥岩的主要物理力学性质指标建议值见表1。

2.2 光伏支架基础主要设计参数

（1）光伏阵列区地震影响参数：根据《中国地震动参数区划图》（GB18306—2015），^[27]场区地震基本烈度7度、地震动峰值加速度 0.15 g ；II类场地。

（2）基本风压为 0.30 kN/m^2 （50年一遇），地面粗糙度为B类。

（3）环境类别：II A类。

（4）50年一遇基本风压： 0.30 kN/m^2 。

（5）50年基本雪压为： 0 kN/m^2 。

（6）光伏组件尺寸及重量： $2278 \text{ mm} \times 1134 \text{ mm}$ ， 32.3 kg 。

（7）固定支架倾角： 26° 。

（8）风荷载体型系数取值：1.3。

（9）风荷载放大系数取值：1.2。

（10）主要建筑材料：①灌注桩混凝土：C30；②钢筋：箍筋HPB300、纵筋HRB400；③支架钢材：Q235B钢、Q345钢。

表1 耕植土、强风化泥岩的主要物理力学指标建议值

Tab.2 The recommended values of main physical and mechanical properties of cultivated soil and strongly weathered mudstone are

| 地层岩性 | 密实度或风化状态 | 岩体基本质量等级 | 天然密度 | 地基承载力特征值 | 干作业钻孔桩桩长微孔灌注桩 | |
|-------|----------|----------|--|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | f_{sk} / kPa | 桩基础极限侧阻力标准值 q_{sk} / kPa | 桩基础极限端阻力标准值 q_{pk} / kPa |
| 耕植土 | | | 1.785 | / | / | / |
| 强风化泥岩 | 强风体 | V | 2.244 | 360 | 120 | 1200 |

3 支架基础结构设计

3.1 支架设计

在山地光伏发电工程实践中，光伏阵列支架常用的结构型式主要有双立柱支架和单立柱支架结构。这两种支架最大不同在于光伏支架构造。双立柱支架有主梁、次梁、前支柱、后支柱、斜支撑和双立柱基础等部分，它的设计是前后两个支柱配合斜支撑，共同托起主次梁，再由主次梁支撑光伏电池板，前后支柱和基础通过螺栓相连；单立柱支架则包含主梁、次梁、前后支撑、钢柱、抱箍和单桩基础等关键部分，利用两个斜支撑抬起主次梁来支

撑光伏电池板，钢斜撑和单立柱基础间靠抱箍连接，整体构造简单且效率高。

单立柱支架比双立柱支架钻孔工程量少，施工工期快，工程投资相差不大，但支架的可调节性和整体稳定性相对双立柱支架较差，从基础超载能力分析，双立柱方案，支架立柱主要受到轴向力，考虑了支架失稳等因素，应力裕度较大。单立柱方案由于立柱主要受到弯矩作用，支架应力裕度较小。因此，双立柱方案要比单立柱方案超载能力强。本项目为山地项目，地形起伏及微地形变化较大，为更好地适应本项目地形，方便支架安装及调节，推荐使用双立柱固定支架型式。

3.2 光伏发电支架基础间距

根据光资源分析及相关电力计算，本项目每个组串支架由28块278 mm × 1134 mm单晶硅组件组成，2行14列排布，电池板竖向布置，每个组串组成一个支架，光伏板最低端距地面高度不小于2.5 m，固定支架倾角26°，支架总长为16.2 m，因此对于该支架布置型式的柱距布置有两个比选方案(详见表2)：方案1支架立柱基础为“2 × 5”布置；方案2支架立柱基础为“2 × 4”布置。

表2 单个组串支架技术经济对比表

Tab.2 Technical and economic comparison table of single string bracket

| 序号 | 项目 | 方案1 | 方案2 |
|----|-------------------------|----------|----------|
| 1 | 基础布置型式 | 2 × 5 | 2 × 4 |
| 2 | 东西向柱距 /m | 3.6 | 4.7 |
| 3 | 支架外挑长度 /m | 0.9 | 1.05 |
| 4 | 支架用钢量 /kg | 555 | 602 |
| 5 | 基础混凝土用量 /m ³ | 0.35 | 0.55 |
| 6 | 基础钢筋用量 /kg | 57.70 | 71.84 |
| 7 | 钻孔 /m | 11.5 | 11.2 |
| 8 | 投资 / 元 | 6 681.22 | 7 081.13 |

方案1单个组串的支架立柱基础间距较小，支架用钢量整体较少、基础混凝土用量较少、整体投资较省且支架立柱基础数量较方案1多，适应地形能力和安全性更高；方案2支架立柱基础数量较方案1少，施工钻孔数量少，施工速度较方案1

快约20%，但支架用钢量、基础混凝土用量、整体投资均不如方案一优，且支架立柱基础数量较方案1少，安全性不如方案1。故本项目推荐采用方案1，即支架立柱基础为“2 × 5”布置方案。方案1、方案2的单个组串支架技术经济比较见表2，方案1(推荐方案)的单个组串支架立柱基础平面布置见图2。

3.3 光伏支架基础设计研究

(1) 光伏支架基础选型。



图2 方案1的单个组串支架基础布置图(推荐采用)
Fig.2 Single string support foundation layout of scheme 1 (recommended)

光伏发电项目通常占地面积较大，需要大量光伏支架及基础，其基础的工程造价在土建成本中占比高达40%左右。因此，根据项目实际情况，科学合理地选择基础形式并进行准确地设计，对于控制成本、确保项目质量和稳定性具有至关重要的意义。^[28]陆地光伏支架基础常见的包括有钢筋混凝土独立基础、钢筋混凝土条形基础、预制管桩基础、钻孔灌注桩基础、钢螺旋桩基础、型钢基础、岩石锚杆基础等(见图3)。

①钢筋混凝土独立基础。混凝土独立基础形式简单，应用广泛，需进行场地平整后施工，存在挖方填方工作量。并且独立基础施工复杂，需要开挖土方，绑钢筋，支模等工序，施工工期较长，并且需要较多的人工，机械化程度较低。

②钢筋混凝土条形基础。主要由独立基础与基础间拉梁形成，多用于柱间距较大，地基承载力较差，对不均匀沉降要求较高的支架中。但是同钢筋混凝土独立基础一样存在开挖土方，绑钢筋，支模，机械化程度较低等不利因素。条形基础相对独立基础混凝土用量较大，经济性稍差，但适用于地基较差或对沉降要求较高的工程。

③预制管桩基础。预制桩在地面批量预制成桩后，采用静压或夯入地基内，桩头需采取加强措施，多用于淤泥质土、填土、湿陷性黄土等。施工不存在填挖方，仅需简单场平。预制桩式基础在预制厂可实现批量生产，成桩质量稳定且较好，其施工速度快，能根据地形起伏灵活调整桩顶标高，但

对于密实砂土、压实土等较硬土层采用振动打桩机难以压入,若采用锤击打桩成本太高,且打桩速度慢。

④钻孔灌注桩基础。钻孔灌注桩采用钻孔设备在地面钻孔后,放入提前绑扎好钢筋笼,高出地面部分支模,预埋铁件后浇注混凝土,适用于一般填土、黏性土、粉土。砂土地基成孔困难,存在塌孔现象,如果在成孔处洒水湿润后能避免塌孔,也可使用。此类桩施工快,顶标高宜控制,不存在填挖方工程,简单场平即可,对原有地貌影响小,但若现场质量控制不好易出现塌孔、缩颈等现象。

⑤钢螺旋桩基础。此类桩为支架厂家制作成品钢管型材桩,由专业打桩设备打入地基。适用的地质条件环境有沙漠、草原、滩涂、戈壁等。此类桩不被地下水干扰,冬季也能正常施工,施工迅速,标高调整简便,对环境破坏小,无需填挖方工程和场地平整。但是该桩型对场地的适应性较差,遇到岩石和坚硬的土层很难成桩,并且钢制螺旋桩抗腐蚀能力较差,对腐蚀性场地不合适采用该桩型。

⑥型钢基础。型钢基础的特点为可批量制作,采用静压方式成桩,施工速度快,但用钢量较大,增加造价,适用于黏性土或砂性土地基。

⑦配重式基础。配重式基础多为大块式基础,体量较大,采用基础自重抵抗支架承载力及倾覆力,多用于基础开挖困难,或不适于开挖的地基。

⑧岩石锚杆基础。岩石锚杆基础适合直接位于基岩上的柱基,及需要承受较大拉力或水平力的构筑物基础。

根据项目地勘资料,地基土对混凝土结构、钢筋混凝土结构中的钢筋及钢结构具有微腐蚀性,依据《工业建筑防腐蚀设计标准》(GB / T 50046—2018),^[29]不需采取防腐措施。

钻孔灌注桩基础因具有施工效率、承载力高、沉降小、耐久性好、利于植被保护等优点。经比较,推荐采用微孔灌注桩基础。

(2) 光伏支架微孔灌注桩基础设计。

光伏支架桩基础桩径185 mm、桩长1.45 m,其中入土层深 $H=1.15$ m,外漏地面 $L=0.3$ m,灌注桩混凝土采用C30细石混凝土(粗骨料最大粒径不大于15 mm),桩身三根纵向主筋采用12、螺旋箍筋采用 $\Phi 8@150$ (桩身中间部位长0.5 m的范围内设置箍筋加密区段 $\Phi 8@100$)(见图4)。

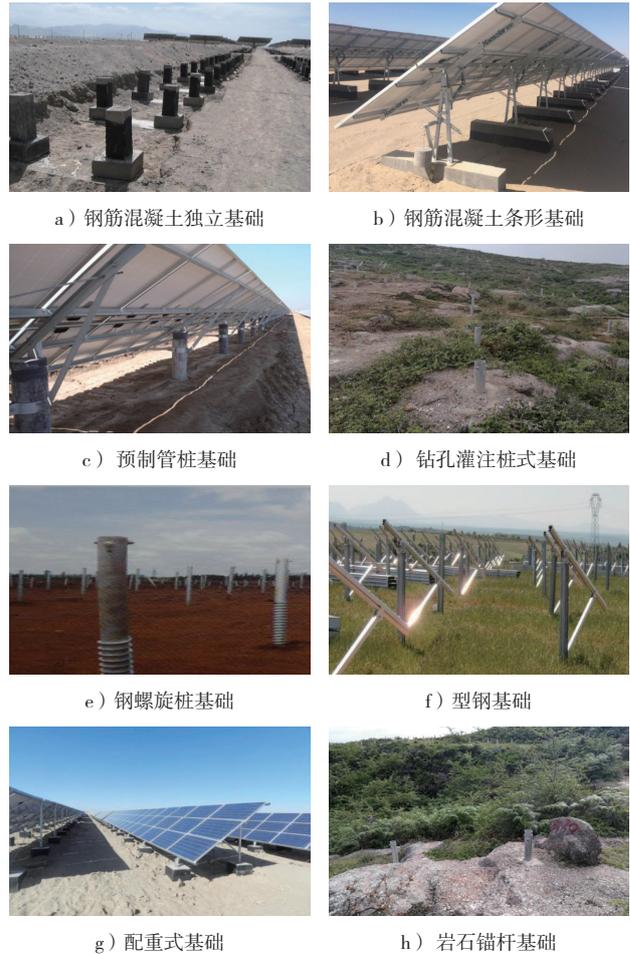


图3 光伏支架基础形式
Fig.3 Basic form of photovoltaic bracket

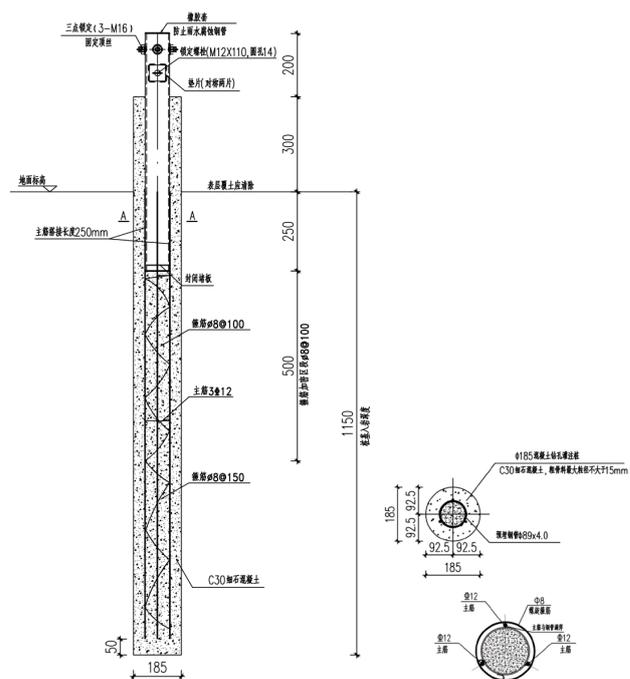


图4 支架基础大样图
Fig.4 Scaffold base sample diagram

4 主要工程量

每个组串支架采用“2×5”基础布置型式，共计10个桩基础，单个桩基础工程量详见表3。

表3 单个桩基础主要工程量表

Tab.3 Main engineering quantity table of single pile foundation

| 序号 | 项目 | 规格型号 | 数值 | 备注 |
|----|-----------------------|------------|-------|-------------|
| 1 | 细石混凝土 /m ³ | C30 | 0.035 | 理论值，不含损耗 |
| 2 | 埋设钢管套 /mm | 直径 89×4.0 | 0.75 | |
| 3 | HRB400 桩主筋 /kg | 3Φ12 | 2.95 | 单根长 1100 mm |
| 4 | 桩箍筋 /kg | Φ8@100/150 | 2.82 | 螺旋箍筋 |
| 5 | 垫片 /块 | -4.0×50×50 | 2 | |
| 6 | 螺栓 /个 | M16 | 3 | |
| 7 | 钢管橡胶套 /个 | 直径 89 | 1 | |

4.1 设计计算

支架基础主要承受风荷载以及支架和光伏组件的自重。在风荷载作用下，基础可能出现倾覆或拔起等破坏，需对基础进行稳定性验算，包括桩基抗拔、水平力和竖向承载力的计算，在正常使用极限状态下，荷载效应采用标准组合。

(1) 计算依据。

国标《光伏电站设计规范》(GB5079—2012)；^[30]《太阳能发电站支架基础技术规范》(GB 51101—2016)；^[31]《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)；^[32]《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010 2015年版)。^[33]

(2) 设计计算。

根据《光伏电站设计规范》(GB50797—2012)^[27]在荷载效应标准组合下可得：

- ① 1×1恒荷载+1×1正风荷载；
- ② 1×1恒荷载+1×1负风荷载。

根据组件、支架等上部结构和风压，利用3D3S钢结构计算软件，计算可得：支架立柱基础桩的 $N_{\text{竖向力}}=23\text{ kN}$ 、 $N_{\text{上拔力}}=7\text{ kN}$ 、 $N_{\text{水平力}}=8\text{ kN}$ 。

①桩基抗拔承载力计算。

依据规范，承受拔力的桩基础须符合：

$$N_{\text{上拔力}} \leq \frac{1}{K} T_{\text{uk}} + G_p \quad (1)$$

由计算可得 $N_{\text{上拔力}}=7\text{ kN}<25.19\text{ kN}$ ，满足要求。

②桩基水平力承载力计算。

依据规范，当桩的水平承载力由水平位移控制且缺少单桩水平静载试验时，承受水平荷载的桩基

础须符合：

$$R_{\text{ha}} = \frac{0.75\alpha^3 \cdot EI \cdot \chi_{0a}}{V_x} \quad (2)$$

由此可得 $N_{\text{水平力}}=8\text{ kN}<R_{\text{ha}}=12.41\text{ kN}$ ，满足要求。

③桩基竖向承载力计算

在轴心荷载效应标准组合下，竖向荷载的桩基础须符合：

$$N_{\text{竖向力}} \leq R_a \quad (3)$$

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{\text{uk}} \quad (4)$$

由计算可得 $R_a=95.90\text{ kN}>N_{\text{竖向力}}=23\text{ kN}$ ，竖向承载力满足要求。

4.2 连接设计

光伏支架立柱与基础间有焊接、螺栓连接、钢管套接三种连接方式。螺栓连接能适应结构变形，安装快且方便；焊接施工速度慢，焊机入场需长距离供电，且现场施焊受天气影响大；钢管套接是通过基础预埋钢管，光伏支架立柱钢管与预埋钢管进行套接，该方案施工速度快，可根据地形变化进行调节，有利于施工。所以本工程采用钢管套接。

5 微孔灌注桩基础施工

双立柱光伏支架微孔灌注桩基础施工工序主要有：放线测量→基础中心定位→钻孔→钢筋笼放置→桩基地面承台模板安装→预埋件放置→混凝土浇筑→模板拆除→混凝土养护→中心线、标高、垂直度检测。

施工要求：①基础点位放样前必须复测整组桩位地形，如发现坟地、水池、管线等特殊地理地貌，应及时通知处理。②施工过程中应提前展放清表施工线，尽可能避免破坏组件附近的植被。③桩孔施工要保证孔深、直径符合要求，允许偏差为：孔中心位移偏差小于10 mm，前后桩孔间距中心位相对位移偏差小于10 mm，左右桩孔间距中心相对位移偏差小于20 mm，垂直度偏差不得超过0.5%。④搬运和安装钢筋笼时，需要避免变形，放置时对准孔位，防止碰撞孔壁和自由下落，就位后用水泥垫块固定钢筋笼。⑤钻孔超过设计埋深时，超钻深均需浇筑混凝土至设计负标高后方可预埋钢筋笼浇筑基础。⑥基础混凝土严禁出现狗洞、露筋等质量问题。⑦基础浇注时，一般应一次浇筑成型。

对超35°的大坡度复杂山地而言，施工难度

最大的为成孔施工，本项目采用小型凿岩潜孔钻（俗称“小蜜蜂”）人工成孔，需4人及以上人工抬小型凿岩潜孔钻进行成孔，（见图5）同时要做好配套安全防护，钻孔最大深度1.2 m。该工艺的特点是不受地质条件限制，地质条件复杂的硬度高岩石区域均可适用。



图5 “小蜜蜂”潜孔钻机人工成孔图

Fig.5 'little bee' down-the-hole drilling rig artificial hole diagram

钢筋笼制作安装和混凝土灌注等是常规工艺。桩基础施工前应按相关规范要求要求进行试桩试验，最终的单桩各项极限承载力标准值应通过现场桩基静载试验来确定，达到设计要求后才能开展桩基施工。施工完成后，要依据规范进行承载力检测。

6 环境影响分析

在大坡度复杂山地光伏发电阵列区采用人工成孔的双立柱光伏支架微孔灌注桩基础，其环境影响分析如下：

（1）生态影响指标。

植被破坏：在施工过程中，基础施工会破坏一定面积的地表植被，造成植被覆盖度下降。但双立柱光伏支架微孔灌注桩基础的施工面积相对较小，对植被的破坏程度相对较低，能够较好地保留原有的植被覆盖度，减少对生态系统的影响。

土地利用变化：光伏阵列区的土地利用类型会发生改变，由自然山地变为光伏发电用地，这可能会对当地的生态系统产生一定的干扰。但由于该基础形式不需要大面积的场地平整，对土地原有形态的改变相对较小，且同时实现对已征地光伏发电阵

列区范围内地形坡度超 35° 的大坡度复杂山地的利用，提高土地资源的利用率。

（2）水土流失指标。

水土流失量：施工过程中的土方开挖和回填等操作会扰动地表土壤，使其抗侵蚀能力下降，在降雨等因素的作用下容易引发水土流失。但由于采用的是微孔灌注桩基础，孔径较小，土方开挖量相对较少，相较于传统的基础形式，其造成的水土流失量会有所减少。

水土流失范围：主要集中在桩基础施工区域及其周边一定范围内，由于施工区域相对分散且面积较小，其水土流失范围相对有限。

（3）施工影响指标。

施工噪声：施工过程中会产生一定的噪声污染，主要包括打桩、混凝土浇筑等施工活动产生的机械噪声。这些噪声会对周边的生态环境和居民生活产生一定的干扰，但施工噪声通常是暂时性的，随着施工的开始，其影响也会逐渐消失，并且通过采取合理的施工管理和环保措施，如使用低噪音设备等，可以有效降低噪声对周边环境和居民生活的影响。

施工扬尘：基础施工过程中的土方开挖、运输以及物料堆放等环节会产生扬尘，对空气质量产生一定的影响。但通过采取洒水降尘、物料覆盖等措施，可以有效降低扬尘的产生和扩散。

施工废弃物：因该基础形式不需要大量的建筑材料和复杂的施工工艺，施工过程中产生的废弃物相对较少。通过合理地分类回收和集中处理，可以进一步减少施工废弃物对环境的负面影响。

④运行期影响指标。

光污染：光伏组件会对太阳光产生一定的反射，形成光污染。但光伏组件的反射率相对较低，且反射光多为漫反射，不属于镜面反射，对周边环境和居民的影响较小。

对野生动物的影响：光伏阵列区的建设会改变原有的生态环境，对野生动物的栖息地产生一定的干扰。但由于该基础形式不需要大面积的场地平整和土地占用，对野生动物的生存空间影响相对较小。同时，光伏阵列下方的空间还可以为一些小型野生动物提供遮蔽场所。

7 结语

本文针对国内传统山地光伏发电项目未利用已

征用土地范围内的地形坡度超过 35° 的复杂山地区域造成土地资源浪费的现状情况,以云南玉溪新平某一光伏发电项目为研究对象,结合地形坡度超 35° 的大坡度复杂山地地形起伏大、高差明显、地质条件复杂(可能存在强风化岩层、松散堆积层等)、易水土流失、生态环境脆弱、施工机械可达性差等特点,通过工程实例与参数优化,创新性地对地形坡度超 35° 的大坡度复杂山地光伏支架基础体系设计应用进行了较为深入的探讨分析研究,实现对地形坡度超 35° 的大坡度复杂山地光伏发电阵列区采用人工成孔的双立柱光伏支架微孔灌注桩基础承载力提升与成本控制的兼顾,以提高已征用土地资源的利用率、降低项目投资成本、增加项目单位面积发电效益,研究成果可为类似地形地质条件的复杂地形光伏项目开发提供技术支撑参考,具有显著的经济效益和环境效益。

参考文献

- [1] 祝培甜, 马永欢, 陈相利, 等. 双碳背景下绿色能源用地研究: 以风力发电和光伏发电为例 [J]. 宏观经济管理, 2024(11):45-51.
ZHU Peitian, MA Yonghuan, CHEN Xiangli, et al. Explore Green Land Use Against the Background of Carbon Peaking and Carbon Neutrality—Take Wind and Solar Power Generation as Examples [J]. Macro-economic Management, 2024(11):45-51.
- [2] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究 [J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.
XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.
- [3] 李立, 吴林, 文红晏, 等. 大坡度斜坡光伏支架设计应用分析 [J]. 能源与节能, 2021(3):202-204.
LI Li, WU Lin, WEN Hongyan, et al. Analysis on Design and Application of Photovoltaic Support for Large Slope [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(3): 202-204.
- [4] 邹才能, 李士祥, 熊波, 等. 新能源新兴产业在推动新质生产力中的地位与作用 [J]. 石油学报, 2024,45(6): 889-899.
ZOU Caineng, LI Shixiang, XIONG Bo, et al. Status and Role of Emerging Industries of New Energy in Promoting New Quality Productive Forces [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024,45(6):889-899.
- [5] 胡山鹰, 金涌, 张臻焯. 发展新质生产力, 实现碳中和 [J]. 发电技术, 2025, 46(1): 1-8.
HU S Y, JIN Y, ZHANG Z Y. Developing new quality productive forces to achieve carbon neutrality [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(1): 1-8.
- [6] 李博, 石红晖, 马强, 等. 风电-火电-压缩空气储能综合能源系统运行特性研究 [J]. 电力科技与环保, 2024,40(2):168-177.
LI Bo, SHI Honghui, MA Qiang, et al. The operating characteristics research of integrated energy system based on the wind, coal-fired power plant and compressed air energy storage [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(2):168-177.
- [7] 陈耀森, 陈贻颖, 汪枫, 等. 直驱式同步风力发电机组的仿真模拟 [J]. 电力科技与环保, 2023,39(1):619-626.
CHEN Yaosen, CHEN Yihao, WANG Feng, et al. Modeling and simulation of direct-drive synchronous wind turbine [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023,39(1):619-626.
- [8] 邹才能, 李士祥, 熊波, 等. 新质生产力下“能源绿色转型”革命及意义: 兼论“能源三角”理论认识 [J]. 石油勘探与开发, 2024,51(6):1395-1408.
ZOU Caineng, LI Shixiang, XIONG Bo, et al. Revolution and Significance Of “Green Energy Transition” in the Context of New Quality Productive Forces: a Discussion on Theoretical Understanding of ‘Energy Triangle’ [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(6):1395-1408.
- [9] YIN L F, ZHENG D. Decomposition Prediction Fractional-Order PID Reinforcement Learning for Short-Term Smart Generation Control of Integrated Energy Systems [J]. Applied Energy, 2024, 355:122246.
- [10] 白永秀, 鲁能, 李双媛. 双碳目标提出的背景、挑战、机遇及实现路径 [J]. 中国经济评论, 2021(5):10-13.
BAI Yongxiu, LU Neng, LI Shuangyuan. The Background, Challenges, Opportunities and Realization Path of the Double Carbon Target [J]. China Economic Review, 2021(5):10-13.
- [11] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述 [J]. 发电技术, 2023, 44(5): 602-615.
PENG D G, SHUI J J, WANG D H, et al. Review of virtual power plant under the background of “dual carbon” [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 602-615.

- [12] 朱法华, 徐静馨. 双碳背景下中国与主要发达国家电力低碳转型比较 [J]. 电力科技与环保, 2024, 40(6): 561-571.
ZHU Fahua, XU Jingxin. Comparison of low-carbon transformation in electricity between China and major developed countries under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(6):561-571.
- [13] 王戎, 陈祉叶, 曾嘉伟, 等. “双碳”目标下中国能源转型的战略思考 [J]. 科技导报, 2024,42(19):10-19.
WANG Rong, CHEN Zhiye, ZENG Jiawei, et al. Strategic Consideration of China's Energy Transition under the 'Dual-Carbon' Goal [J]. Science & Technology Review, 2024,42(19):10-19.
- [14] 国家能源局. 国家能源局发布 2024年1—11月全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2024-12-20) [2025-01-17]. <https://www.nea.gov.cn/20241220/73f189cc6e6540caafac2b819623fc08/c.html>.
- [15] 国家能源局. 电力系统调节能力优化专项行动实施方案 (2025—2027年) [EB/OL]. (2024-12-20) [2025-01-17]. <https://www.nea.gov.cn/20250106/6a9d8a6e621d495db0ca2ba14196f00f/c.html>.
- [16] LINCOT D. The New Paradigm of Photovoltaics: From Powering Satellites to Powering Humanity [J]. Comptes Rendus Physique, 2017, 18(7/8):381-390.
- [17] 孟梓睿, 刘雅雯, 巨星. 光伏-压电复合独立供电系统的运行分析 [J]. 发电技术, 2024, 45(4): 696-704.
MENG Z R, LIU Y W, JU X. Operation analysis of a photovoltaic-piezoelectric composite independent power supply system [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 696-704.
- [18] 王霄, 王树青, 宋宪仓, 等. 海上漂浮式光伏平台研究进展与关键技术 [J/OL]. 工程科学与技术, 2025:1-16. (2025-01-06). <https://link.cnki.net/doi/10.15961/j.jsuese.202400217858>.
WANG Xiao, WANG Shuqing, SONG Xiancang, et al. A Review of Research Progress and Key Issues of Off-shore Floating Photovoltaic Platforms [J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2025:1-16. (2025-01-06). <https://link.cnki.net/doi/10.15961/j.jsuese.202400217858>.
- [19] 欧阳志政. 太阳能光伏电站助力乡村振兴发展 [J]. 太阳能学报, 2024,45(11):757.
OUYANG Zhizheng. Solar Photovoltaic Power Station Helps Rural Revitalization and Development [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024,45(11):757.
- [20] 江涵, 顾宗奇, 施啸寒, 等. 乡村振兴背景下农村数字化用能方案及清洁低碳发展研究 [J]. 电力大数据, 2024, 27(7):1-14.
JIANG Han, GU Zongqi, SHI Xiaohan, et al. Research on Digital Intelligent Energy Use Programme and Clean Low-Carbon Development in the Context of Rural Revitalization [J]. Power Systems and Big Data, 2024, 27(7):1-14.
- [21] 张继. 基于光伏储能的配电网优化运行策略 [J]. 储能科学与技术, 2024,13(11):4062-4064.
ZHANG Ji. Optimal Operation Strategy of Distribution Network Based on Photovoltaic Energy Storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4062-4064.
- [22] 周孝信, 赵强, 张玉琼, 等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析: 绿电替代与绿氢替代 [J]. 中国电机工程学报, 2024,44(17):6707-6721.
ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, et al. Analysis of the Development Trend of China's Energy and Power System under the Dual Carbon Target: Green Electricity Substitution and Green Hydrogen Substitution [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6707-6721.
- [23] 李振坡, 罗朋, 崔鹏飞, 等. 光伏支架基础陡坡施工工艺研究 [J]. 经济技术协作信息, 2020(33):92-93.
LI Zhenpo, LUO Peng, CUI Pengfei, et al. Study on Construction Technology of Steep Slope of Photovoltaic Support Foundation [J]. Economic and Technical Cooperation Information, 2020(33):92-93.
- [24] 吴龙生, 关永明, 石亚. 山地光伏支架基础灌注桩适应性选择探讨 [J]. 粘接, 2021,48(11):145-148,153.
WU Longsheng, GUAN Yongming, SHI Ya. Discussion on the Adaptive Selection of Photovoltaic Support Foundation Cast-in-Place Pile in Mountainous Area [J]. Adhesion, 2021, 48(11):145-148, 153.
- [25] 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.
WANG Min. Treatment of Abnormal Construction of Mountainous Photovoltaic Support Foundation [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2022, 43(S2):55-58.
- [26] 李伟, 田成, 林军才. 浅谈大坡度、复杂地形光伏电站灌注桩施工质量控制 [J]. 红水河, 2024,43(4):102-105.
LI Wei, TIAN Cheng, LIN Juncai. Construction Quality Control of Cast-in-Place Pile in Photovoltaic Power Station with Steep Slope and Complex Terrain [J]. Hongshui River, 2024, 43(4):102-105.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管

- 委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB 18306—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [28] 赵婷婷, 江赛雄. 光伏支架基础选型与设计优化研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2353-2357.
- ZHAO Tingting, JIANG Saixiong. Study on Foundation Selection and Design Optimization of PV Support [J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 2353-2357.
- [29] 住房和城乡建设部. 工业建筑防腐蚀设计标准: GB/T 50046—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Anticorrosion Design of Industrial Constructions: GB/T 50046—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏电站设计标准: GB 50797—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of Photovoltaic Power Station: GB 50797—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 太阳能发电站支架基础技术规范: GB 51101—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specifications for solar power station support foundation: GB 51101—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [32] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [33] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.

收稿日期: 2024-10-16。

作者简介:



张甲元

张甲元(1989), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程, 光伏发电、风力发电等新能源。