

复杂地质条件下大跨度索结构柔性光伏支架关键技术研究

乔 晗 颌延龙 刘小龙 遇 沛

陕西华电宜川新能源有限公司 陕西 延安 716299

摘 要：本文围绕复杂地质条件下大跨度索结构柔性光伏支架关键技术展开研究。分析了该支架的技术原理，以及软土地基、岩溶地貌等复杂地质条件的分类及影响。探讨了索体选型与受力计算、基础形式与锚固设计等设计关键技术，阐述了基础施工工艺、索体张拉与精度控制等施工关键技术，还研究了结构性能保障与监测技术，为相关工程应用提供技术参考。

关键词：大跨度索结构；柔性光伏支架；复杂地质；施工技术；结构监测

引言：在全球能源转型大背景下，光伏发电作为清洁能源的关键力量，发展迅猛。大跨度索结构柔性光伏支架凭借可跨越复杂地形、减少支撑结构数量等优势，成为光伏建设领域的研究热点。然而，复杂地质条件如软土地基、岩溶地貌等，给支架的基础稳定性、结构受力等带来诸多难题。深入探究复杂地质条件下大跨度索结构柔性光伏支架关键技术，对保障光伏系统稳定运行、提高能源利用效率意义重大。

1 技术基础与地质特性分析

1.1 大跨度索结构柔性光伏支架技术原理

大跨度索结构柔性光伏支架由索体支撑结构和光伏组件连接系统构成。索体作为主要受力构件，采用高强度纤维材料或钢绞线制成，通过两端锚固形成跨越结构。支撑结构包括塔架或立柱，为索体提供竖向支撑点，使索体保持合理的受力形态^[1]。光伏组件连接系统通过夹具和连接件将光伏板固定在索体上，形成稳定的阵列。其工作机制依赖索体张拉产生的预应力。张拉过程中索体产生轴向拉力，形成能够承受光伏组件自重和风荷载等作用的受力体系。这种体系可实现较大跨度覆盖，减少支撑结构数量，适合跨越复杂地形。柔性变形特性是其显著特点，当荷载变化时索体可产生一定范围内的弹性变形，通过调整自身形态分散应力，避免局部受力过大导致破坏。荷载消失后索体恢复原有形态，保证光伏组件保持稳定的安装角度。

1.2 复杂地质条件分类及影响

复杂地质条件可分为多种类型。软土地基由淤泥或粘性土组成，具有含水量高和承载力低的特征，受力后易产生较大沉降且沉降持续时间长。岩溶地貌因岩石溶蚀形成溶洞和裂隙，地表下存在不规则空洞，地基完整性差。陡坡地形坡度较大，地表倾斜角度通常超过25度，重力作用明显易发生土体滑动。强震区地质构造活

跃，地震活动频繁且强度较高，地表易产生震动和位移。不同地质条件对支架产生多方面影响。软土地基会导致支架基础缓慢沉降，使索体锚固点产生相对位移，改变索体受力状态影响整体稳定性。岩溶地貌中溶洞可能导致基础突然下沉，破坏索体锚固效果，使支架结构产生不均匀变形。陡坡地形使支架基础承受较大侧向力，若基础抗滑移能力不足，可能引发整体结构倾斜，导致索体拉力分布失衡。强震区地震产生的振动会使索体和支撑结构产生共振，加剧索体疲劳损伤，同时可能导致基础松动影响锚固可靠性。

2 大跨度索结构柔性光伏支架设计关键技术

2.1 索体选型与受力计算

索体材料的力学性能需满足多方面要求。强度是核心指标，需能承受光伏组件自重和外部荷载产生的拉力，在长期受力下不发生塑性变形。耐腐蚀性同样重要，材料需抵御大气中的水分、盐分及土壤中的化学物质侵蚀，避免因腐蚀导致截面缩减或强度下降^[2]。疲劳寿命需与支架整体使用寿命匹配，应对反复荷载作用下的累积损伤，确保在长期使用中不出现断裂。基于这些要求，常见的索体类型包括高强度钢丝绳、碳纤维复合索等，钢丝绳具有较高的抗拉强度和经济性，碳纤维复合索则在耐腐蚀性和轻量化方面更具优势。索体受力计算模型需综合考虑多种因素。跨度直接影响索体的受力状态，跨度增大时索体的挠度和张拉应力会相应变化。荷载包括光伏组件的自重、风荷载、雪荷载等，不同荷载组合会产生不同的应力分布。地质条件通过基础变形间接影响索体受力，地基沉降会改变索体的初始张力和支座位置。计算模型需模拟这些因素的相互作用，得出索体的张拉应力，确保其处于材料允许范围内，同时计算挠度，控制在不影响光伏组件工作的合理区间，避免因挠度过大导致组件相互挤压或遮挡。

2.2 基础形式与锚固设计

针对不同复杂地质条件需采用对应的基础形式。软土地基承载力低,可采用桩基穿过软弱土层,将荷载传递至下部坚实土层,桩基长度根据软土层厚度确定,桩身材料需具备抗侧移能力。岩溶地貌存在地下空洞,锚杆基础通过将锚杆深入完整岩层内部,利用岩层的锚固力固定基础,锚杆长度需穿过溶洞区域到达稳定岩层。陡坡地形易发生滑动,配重基础通过增加基础自重抵抗横向推力,配重材料可选用混凝土块或石块,配重大小根据坡度和荷载计算确定。基础与地质体的结合方式直接影响锚固强度。桩基通过桩侧摩阻力和桩端承载力与地质体结合,桩侧需进行表面处理以增加摩擦力,桩端嵌入坚实土层或岩层一定深度。锚杆基础通过锚杆与岩层的粘结力实现锚固,锚杆孔需清理干净并注入高性能粘结材料,确保锚杆与孔壁紧密结合。配重基础通过自重产生的摩擦力和正压力与地表结合,基础底部可设置防滑凸台,增加与地表的咬合作用。这些结合方式需能有效抵抗拉力、剪力和弯矩,防止基础滑移或倾覆,提升整体结构的抗拔性能,确保索体张拉时基础稳定可靠。

2.3 柔性支撑体系布局优化

索体布置方式需实现荷载均匀分布。跨度划分应结合地质条件和荷载大小,在地形起伏较大区域可采用不等跨度布置,使各段索体受力相对均衡。索网形态可采用单向索、双向索网等形式,单向索适用于狭长区域,双向索网则在大面积布置时能更好地分散荷载。索体之间的间距需考虑光伏组件的尺寸和安装角度,避免组件之间相互遮挡,同时保证索体能够共同承担荷载。光伏组件与索结构的连接节点设计需兼顾牢固性和适应性。连接节点需采用高强度材料制作,确保能够承受组件自重和外部荷载,连接方式可采用螺栓连接或夹具夹持,连接部位需进行防腐处理,防止锈蚀影响强度。节点应具备一定的转动或滑动能力,允许光伏组件随索体变形而轻微调整角度,避免组件因结构变形产生附加应力。通过优化节点构造,使组件在索体变形时能够保持稳定的安装姿态,既保证连接牢固不脱落,又能适应结构的柔性变形,确保光伏组件的正常工作 and 使用寿命。

3 复杂地质条件下施工关键技术

3.1 基础施工工艺

针对不同地质特性需采用适配的基础施工方法。软土地基因承载能力弱,施工前需对地基进行加固处理,深层搅拌法通过将水泥等固化剂注入软土深层,经机械搅拌使软土硬结,形成具有一定强度的复合地基,加固完成后再进行成桩作业,成桩过程中需控制钻进速度,

避免扰动周边土层引发二次沉降^[3]。岩溶地区存在地下空洞,施工前需探明溶洞分布,采用级配砂石或混凝土填充溶洞,填充材料需分层夯实,确保填充体密实度,填充完成后静置一段时间待沉降稳定,再进行基础施工。施工过程中需应对各类地质异常。软土地基施工时若出现桩体倾斜,应立即停止钻进,分析倾斜原因,采用局部注浆加固桩周土体后重新成桩。岩溶地区填充后若发现新的小型溶洞,需及时补充填充材料并延长静置时间。陡坡地形施工时需先修整坡面,设置临时挡土设施防止边坡坍塌,基础施工应从坡底向坡顶逐步推进,在坡面上铺设防滑垫层,增强基础与地表的摩擦力,确保施工过程安全。这些措施能有效应对地质异常,保障基础施工质量满足设计要求。

3.2 索体张拉与精度控制

索体张拉需确定合理的顺序和工艺。张拉顺序应遵循对称同步原则,从支架两端向中间对称张拉,或从中间向两端逐步扩展,避免因单侧受力过大导致结构变形。张拉工艺可采用分步张拉法,按预定应力值分阶段施加张力,每完成一个阶段张拉需暂停一段时间,待结构变形稳定后再进行下阶段作业。张拉过程中需控制张拉速度,避免速度过快引发结构振动,控制应力增量,确保索体受力均匀变化,减少因应力波动产生的疲劳损伤。实时监测是保证张拉精度的关键。通过在索体上安装应力传感器,实时监测张拉应力变化,根据监测数据调整张拉力度。采用全站仪等设备监测支架结构的位移和变形,若发现位移超出允许范围,需暂停张拉并分析原因,调整张拉参数后再继续作业。张拉完成后需进行复核,确保各索体张拉应力符合设计值,结构形态与设计模型一致,避免因张拉不均导致局部应力集中,影响整体结构稳定性。

3.3 组件安装与定位调整

光伏组件安装流程需适应柔性结构特性。安装前需检查索体张拉状态,确认结构稳定后再进行组件安装。安装过程采用分段作业方式,划分多个安装单元,每个单元内由多人协同作业,避免单人操作引发局部荷载过大。组件起吊时需采用专用吊具,吊点设置在组件重心位置,起吊速度缓慢平稳,避免撞击索体或其他组件。安装顺序从下至上逐步进行,每个组件安装完成后及时固定,防止因索体轻微晃动导致组件移位。定位调整需保证安装精度和阵列平整度。利用安装在索体上的定位基准线,调整组件的水平和垂直位置,使组件边缘对齐,间距均匀。采用激光投线仪辅助定位,确保同一阵列的组件在同一平面上,减少因高低差导致的阴影遮

挡。定位完成后检查组件角度,根据当地日照条件微调角度,提升光能吸收效率。安装过程中需定期检查索体受力状态,若发现应力异常需暂停安装,调整后再继续作业,确保组件安装既符合精度要求,又不影响索体的受力平衡,为后续高效发电奠定基础。

4 结构性能保障与监测技术

4.1 抗风与抗震性能强化

复杂地质区域风荷载呈现独特特点。峡谷地形易形成局部强风,风向多变且风速波动大,可能引发索体颤振。滨海地区风荷载伴随盐分侵蚀,长期作用会削弱索体力学性能。强震区地震作用具有突发性和破坏性,地震波传播过程中因地质差异产生不同振幅和频率,软土地基会放大振动效应,岩溶地貌可能因地基不均匀导致振动响应差异^[4]。增强结构抗风振能力可通过设置阻尼器实现。在索体与支撑结构连接部位安装黏滞阻尼器,利用流体阻尼消耗振动能量,减轻风致振动幅度。优化索体布置方式,调整索网密度和张力分布,改变结构固有频率,避开强风激励频率范围。抗震强化需优化结构刚度分布,在关键节点采用柔性连接,允许一定相对位移以吸收地震能量。基础部位设置隔震垫层,减缓地震波向上传递,降低上部结构振动强度。索体与光伏组件连接节点采用弹性缓冲设计,减少地震时组件与索体间的刚性碰撞。

4.2 长期性能监测系统设计

索体张力监测需覆盖所有主要受力索体,在索体端部或中间部位安装张力传感器,实时捕捉张力变化。基础沉降监测需在基础周边地表布设沉降观测点,定期测量高程变化,掌握沉降速率和累计沉降量。结构变形监测包括整体位移和局部变形,采用三维扫描技术记录结构形态,对比分析不同时期的变形差异。环境荷载监测需采集风速风向温度湿度等参数,分析这些因素与结构

响应的关联。传感器选择需适应复杂地质环境。张力传感器需具备抗腐蚀和抗干扰能力,适应露天潮湿环境。沉降监测采用高精度液位传感器,不受地形起伏影响。变形监测选用耐温差的光学传感器,确保数据稳定性。数据传输方式根据场地条件选择,开阔区域可采用无线传输,信号遮挡区域采用有线传输,确保数据实时上传至监测中心。监测系统需具备数据处理和预警功能。对采集的数据进行实时分析,建立结构正常状态参数模型,当监测值超出正常范围时自动发出预警。系统可生成趋势图表,展示索体张力变化、基础沉降发展等情况,为判断结构性能提供依据。通过长期连续监测,及时发现结构异常,为维护维修提供指导,保障结构在复杂地质条件下长期稳定运行。

结束语

大跨度索结构柔性光伏支架在复杂地质条件下的应用,需综合运用设计、施工及监测等关键技术。通过合理选型、优化设计、精准施工与有效监测,能应对地质带来的挑战,保障支架长期稳定运行。未来需持续完善技术,提升适应性与经济性,为更多复杂地质区域的光伏开发提供有力支撑,促进新能源产业进一步发展。

参考文献

- [1]陈松,汪俊虎,陈默然,等.山地光伏大跨度双层索柔性支架研究分析[J].红水河,2025,44(1):33-36,42.
- [2]徐海巍,李俊龙,何旭辉,等.大跨度单层柔性光伏支架结构气动阻尼的试验研究[J].振动与冲击,2024,43(10):21-29.
- [3]罗晓刚.大跨度柔性光伏支架设计及经济效益研究[J].云南水力发电,2024,40(5):161-164.
- [4]管迎春,郭子臣,陈效,等.水面光伏超大跨支架结构设计及技术应用分析[J].科技创新与应用,2024,14(17):121-124.