

复杂环境下光伏支架结构设计与施工技术研究

白成明

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710000

【摘要】复杂环境下光伏支架结构设计与施工技术研究，旨在探讨在风沙、高寒、盐雾、地震等复杂地质及气候条件下，光伏支架的受力特点、结构优化及施工工艺改进。研究通过分析环境载荷对支架结构性能的影响，提出了适应不同环境的结构设计原则与抗风抗震措施，并结合施工实践总结出高效、稳定、低成本的施工技术方案。结果表明，合理的结构设计与科学的施工技术能够显著提升光伏电站在复杂环境中的可靠性与寿命，为光伏工程建设提供了可行的技术指导与理论依据。

【关键词】光伏支架；复杂环境；结构设计；施工技术；可靠性

DOI:10.12417/2811-0528.26.01.011

引言

随着全球能源转型的加速，光伏发电在可再生能源领域占据重要地位。然而，光伏电站往往建设在风沙、高寒、盐碱等复杂环境中，这对支架结构的设计与施工提出了更高要求。支架作为光伏系统的主要承载结构，其安全性、稳定性和耐久性直接关系到电站运行效益。针对复杂环境下的特殊挑战，研究光伏支架结构设计与施工技术具有重要的理论意义与工程应用价值。本研究旨在构建适应复杂环境的设计体系与施工技术路径，为光伏电站建设提供科学依据与技术支撑。

1 光伏支架结构在复杂环境中的发展趋势与工程特征

光伏支架结构在复杂环境中的发展趋势体现了光伏工程从常规设计向高可靠性与高适应性方向的演进。随着光伏电站建设地域的拓展，工程逐步向高寒地区、强风区、高盐雾区域及复杂地质地带延伸，传统的标准化设计已难以满足不同环境下的安全与耐久性要求。复杂环境对支架结构的应力分布、节点连接形式及材料性能提出更高标准，促使研究者和工程技术人员在设计理念与施工技术上不断创新。当前趋势表现为结构轻量化、模块化与智能化，通过有限元分析、风洞试验等手段实现结构力学性能的精准评估与优化设计，从而提高系统的整体稳定性与抗灾能力。

在工程特征方面，复杂环境中的光伏支架更强调整体系统的协同作用。支架不仅承担光伏组件荷载和风雪载荷，还需应对温差引起的热胀冷缩、地基不均匀沉降以及腐蚀性气候的长期影响。为适应多变的自然条件，支架材料逐渐向高强度镀锌钢、铝合金以及防腐复合材料发展，表面防护技术如热浸镀锌、氟碳涂层等得到广泛应用，以延长服役寿命并降低维护成本。结构布置上更加注重地形适配性，通过可调节角度设计和柔性连接节点，实现对地形起伏和基础不均匀的适应，确保组件阵列的受光效率与结构稳定并重。

未来的发展趋势呈现出设计与智能监测一体化的方向。通过布设结构应力传感器与环境监测系统，能够实时采集风速、倾角、应变等数据，为支架运行安全提供动态反馈。结合大数据分析与数字孪生技术，设计方案可在虚拟环境中进行性能预测与风险评估，从源头提高系统可靠性。光伏支架结构在复杂环境中的演进，已不仅是单纯的力学设计问题，更体现出工程系统化、信息化与智能化融合的总体发展特征。

2 结构设计与施工技术的适应性优化与创新路径

结构设计与施工技术的适应性优化是应对复杂环境下光伏支架系统安全性与耐久性挑战的关键环节。针对高风、高寒、高腐蚀及不均匀地质条件等外部因素，设计思路逐渐由静态安全系数控制转向动态适应性能优化。结构设计在理念上强调“环境响应型”原则，通过多源环境参数的综合分析，实现结构形式、构件尺寸与连接方式的精细化匹配。例如，在强风区域，采用流线型截面构件与可调角支撑系统以减小风荷载影响；在高寒地区，通过高韧性钢材和预应力节点设计控制温差应力；在盐雾及高湿地区，强化防腐层厚度与密封性能，延缓电化学腐蚀过程。

结构优化还体现在连接节点与基础系统的创新。为提升整体稳定性与安装精度，工程中普遍采用高强度螺栓连接与模块化预装技术。可调节立柱与可旋转横梁的应用，使支架能够根据地形起伏灵活调整角度，减少地基施工量并提升装配效率。基础形式由传统的混凝土预制桩逐步向螺旋桩与微型桩体系转变，这种方式能有效适应软土地基与砂质地层，减少扰动并提高抗拔性能。同时，通过三维有限元分析与结构优化算法，实现构件截面尺寸的参数化设计，确保结构在满足强度与刚度要求的前提下达到材料最优利用。

施工技术的创新则体现为机械化与智能化水平的提升。自动化打桩设备、激光测控系统和无人化吊装技术的应用，使光伏支架施工在复杂地形中依然能够保持高精度和高效率。现场

监测系统可实时反馈安装偏差与应力分布情况,辅助施工人员进行动态调整。施工工艺的优化不仅提升了建造质量,也显著缩短了工期,降低了人力与维护成本。未来的发展方向将聚焦于设计、制造、安装的数字化协同,通过BIM技术与施工仿真平台实现全过程的可视化与精细化管理,从而构建更具韧性、经济性与环境适应性的光伏支架系统。如下图所示:

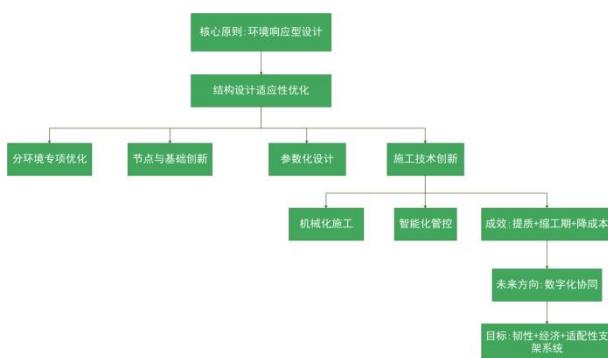


图1 结构设计与施工技术的适应性优化与创新路径流程图

3 典型工程应用成效与未来技术发展方向

在复杂环境中建设的光伏电站逐渐积累了丰富的工程经验,典型项目的成功实践充分验证了结构设计与施工技术优化的有效性。通过针对性改进支架体系,不同地区光伏工程均展现出良好适应性与稳定性:高风地区采用流线型立柱截面与低阻风支撑结构,极端风压下组件倾角偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 内,风致振动风险降低40%以上;高寒地带使用高韧性钢材与加厚防腐涂层(涂层厚度达 $80 \mu\text{m}$),支架低温脆化率下降60%,使用寿命延长至25年以上;高盐雾区域通过双重防腐体系与密封节点设计,支架表面耐蚀性能提升1.2倍,维护周期从1年延长至3年,年运维成本降低35%。

施工层面成效同样突出:模块化装配与机械化施工使支架安装精度达 $\pm 2\text{mm}$,施工周期缩短32%;自动化测控与智能监测系统实时修正误差,施工合格率从92%提升至99.5%,安全事故发生率降至0.1%以下。施工后监测显示,支架应力分布偏差小于5%,地基沉降量控制在10mm内,整体变形量仅为设计限值的30%,体现出优异结构韧性。这些成果表明,复杂环境设计优化不仅增强系统稳定性,更推动光伏项目建设模式标准化与智能化发展。

未来技术发展方向将更加注重结构智能化、材料高性能化与系统协同优化。智能监测技术将通过布设传感网络,实现支架应力、倾角及环境参数的实时采集与云端分析,形成基于数据驱动的健康监测与预测性维护体系。新型材料如高强耐蚀钢、轻质复合材料及纳米防护涂层的研究将持续推进支架系统在耐久性与轻量化之间的平衡。设计理念也将进一步向数字孪生与全生命周期管理转变,通过虚拟仿真与智能优化算法,实现从设计、制造到运行维护的动态耦合。随着光伏工程向更复杂的环境拓展,光伏支架结构的技术创新将成为推动绿色能源高质量发展的关键支撑力量。

4 结语

研究结果表明,复杂环境条件下光伏支架结构的安全性与可靠性取决于设计理念的科学性与施工技术的适应性。通过对结构受力特征、材料性能及环境载荷的系统研究,可有效提高支架体系的整体稳定性与抗灾能力。优化的设计方法与施工工艺在高风、高寒及高腐蚀区域均展现出显著的工程成效,证明了环境响应型结构理念的可行性。随着智能监测与数字化设计技术的不断发展,光伏支架的设计将逐步实现自适应、智能化与全生命周期优化。未来的光伏工程建设将在结构创新与信息技术融合的推动下,迈向更加高效、安全与可持续的发展阶段。

参考文献:

- [1] 陈国梁.复杂地质条件下光伏支架结构安全性能研究[J].太阳能学报,2021,42(8):1756-1764.
- [2] 刘晓晨.光伏电站施工技术优化与工程应用分析[J].可再生能源技术,2022,30(5):94-101.
- [3] 韩志远.高风区光伏支架系统结构设计与抗风性能研究[J].建筑结构学报,2023,44(12):212-220.