

柔性光伏支架结构设计探讨

黄立根

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要：本文聚焦柔性光伏支架结构设计，阐述其定义与高适应性、成本低等特点，分析安全性、经济性、适应性设计原则，探讨地形适应、材料选择等设计要素，并提出新材料研发、工艺改进及标准化建设等优化策略。研究表明，合理设计与优化可提升柔性光伏支架性能，为其在光伏发电领域的广泛应用提供理论与实践指导。

关键词：柔性光伏支架；结构设计；优化策略

1 柔性光伏支架概述

1.1 柔性光伏支架的定义

柔性光伏支架是区别于传统刚性支架的新型光伏发电支撑结构，以柔性索、缆等柔性材料为主要受力构件，与刚性支撑结合形成刚柔耦合体系。传统支架依赖大量钢结构固定光伏组件，而柔性光伏支架凭借柔性材料的柔韧性和延展性，通过预应力施加与结构布局，实现对光伏组件的支撑与定位。该支架系统主要由柔性拉索、端部锚固结构、中间支撑结构及连接组件构成。柔性拉索是核心受力部件，负责传递荷载、维持结构稳定；端部锚固结构将支架固定于基础，保障结构安全；中间支撑结构依地形和设计需求布置，辅助分担荷载、调节组件角度；连接组件确保各部分可靠连接，实现协同工作。其出现为复杂地形与特殊场景的光伏发电提供新方案，拓展了光伏应用范围，推动产业向高效、灵活方向发展。

1.2 柔性光伏支架的特点

柔性光伏支架在光伏发电领域优势显著。其一，高适应性突出，柔性材料使其能契合山地、水面等复杂地形，灵活调整形态，充分利用场地空间，减少地形对电站建设的制约。其二，具备成本优势，相比传统刚性支架，柔性支架精简材料使用，降低钢材消耗与成本；结构简单，减少劳动力与施工设备需求，降低安装成本与难度，还能减少复杂地形下的基础建设工程量与费用^[1]。其三，美观性与环境协调性良好，简洁流畅的结构线条能更好融入自然，在景观要求高的区域，可实现发电与环境保护的双赢。其四，可扩展性强，模块化设计便于后期扩展，增加光伏组件时只需进行简单模块扩展，无需大规模改造，能满足电站规模扩大的需求。

2 柔性光伏支架结构设计原则

2.1 安全性原则

安全性是柔性光伏支架结构设计的首要原则，直接

关系到光伏电站的长期稳定运行和人员财产安全。在设计过程中，必须全面考虑各种可能的荷载工况，包括风荷载、雪荷载、地震作用、温度变化以及光伏组件自重等。通过精确的力学计算和分析，合理确定柔性拉索的预应力大小、截面尺寸以及刚性支撑结构的形式和尺寸，确保支架结构在各种荷载组合下都能保持稳定，不发生破坏或失稳现象。同时，要对支架系统的连接部位进行重点设计和加强，连接组件的可靠性直接影响整个结构的安全性，因此需要选择合适的连接方式和连接材料，确保各部件之间能够牢固连接，在长期使用过程中不会出现松动、脱落等问题。另外，还应考虑结构的耐久性，选择具有良好抗腐蚀性能的材料，并采取有效的防腐措施，防止结构因腐蚀而降低承载能力，延长支架系统的使用寿命。

2.2 经济性原则

经济性原则要求在满足柔性光伏支架结构安全和使用功能的前提下，尽可能降低建设和运营成本。在材料选择方面，需要综合考虑材料的性能、价格和供应情况，优先选用性价比高的材料。例如，在满足结构强度和耐久性要求的前提下，选择价格相对较低的柔性拉索材料和钢材，避免过度追求高性能材料而导致成本过高。在结构设计上，应优化结构布局和构件尺寸，避免不必要的材料浪费。通过合理规划柔性拉索的布置方式和中间支撑结构的间距，减少材料用量的同时保证结构的稳定性。同时简化施工工艺，采用便于安装和施工的结构形式，降低施工难度和施工成本。还需考虑后期的运营维护成本，设计易于维护和检修的结构形式，减少维护工作量和维护费用，提高光伏电站的整体经济效益。

2.3 适应性原则

适应性原则强调柔性光伏支架结构设计要充分考虑不同应用场景的特点和需求。对于不同的地形条件，如

山地、平原、水面等,要设计与之相适应的支架结构形式和安装方式。在山地地区,可利用柔性支架的特点,根据山体走势灵活布置,减少土方工程;在水面上,要考虑水流、水位变化等因素,设计具有良好抗浮和抗冲刷能力的支架结构。还要适应不同的气候条件,在多风地区,加强结构的抗风设计,提高支架系统的抗风能力;在降雪量大的地区,合理设计结构坡度,防止积雪对支架造成过大压力^[2]。随着光伏技术的不断发展和光伏组件规格的变化,支架结构设计还应具有一定的通用性和可调整性,能够适应不同类型和规格的光伏组件安装需求,确保支架系统在未来技术更新和设备更换时仍能继续使用。

3 柔性光伏支架结构设计要素

3.1 地形适应性设计

地形适应性设计是柔性光伏支架结构设计的关键环节之一。在山地地形中,由于地势起伏较大,传统刚性支架往往需要进行大规模的场地平整,不仅工程量大,还容易对生态环境造成破坏。而柔性光伏支架可以根据山地的自然坡度和地形走势,灵活调整支架的高度和角度,实现光伏组件的最佳安装倾角,在减少土方工程的同时,充分利用山地的空间资源。例如,通过设置不同高度的中间支撑结构,使柔性拉索沿着山体轮廓自然延伸,将光伏组件安装在合适的坡面上。在水面环境中,柔性光伏支架的地形适应性优势也十分明显。水面光伏电站面临着水流、水位变化、波浪冲击等特殊问题,柔性支架可以采用浮体与柔性拉索相结合的方式,根据水位变化自动调节高度,保持光伏组件始终处于合适的工作位置。利用柔性材料的柔韧性,有效缓冲波浪对支架的冲击力,提高支架系统在水面环境下的稳定性和安全性。对于滩涂、湿地等软土地基区域,传统支架需要进行复杂的地基处理,而柔性光伏支架可以通过优化锚固设计,采用特殊的锚固方式,如螺旋地锚、重力式锚碇等,减少对地基承载力的要求,降低基础设施建设成本,实现快速安装和稳定支撑。

3.2 材料选择要点

柔性光伏支架的材料选择直接影响其性能和使用寿命。对于柔性拉索材料,主要有高强度钢绞线、芳纶纤维索和碳纤维索等。高强度钢绞线具有较高的强度和良好的韧性,价格相对较低,是目前应用较为广泛的柔性拉索材料,但需要注意做好防腐处理,防止钢绞线生锈影响结构性能。芳纶纤维索具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点,但价格较高,适用于对重量和耐久性要求较高的特殊场合。碳纤维索则具有更高的强度和模量,且

耐疲劳性能优异,但成本也最为昂贵,常用于对性能要求极高的高端项目。在刚性支撑结构材料方面,钢材是常用的选择,普通碳素钢价格较低,但耐腐蚀性较差,需要进行防腐涂装处理;低合金高强度钢具有较高的强度和较好的耐腐蚀性,在满足结构强度要求的同时,可减少钢材用量,降低结构自重,是一种性价比比较高的选择。另外,对于一些对重量和美观性要求较高的场合,也可考虑使用铝合金等轻质材料作为刚性支撑结构。连接组件的材料选择同样重要,应选用具有高强度、高可靠性和良好耐腐蚀性的材料,如不锈钢螺栓、高强度铝合金连接件等,确保各部件之间连接牢固可靠,在长期使用过程中不会出现松动和损坏。

3.3 结构强度与稳定性设计

结构强度与稳定性设计是保证柔性光伏支架正常运行的核心内容。在设计过程中,需要运用先进的力学分析方法,如有限元分析,对支架结构在各种荷载工况下的受力状态进行精确模拟和计算。通过分析结果,合理确定柔性拉索的预应力值,预应力过大可能导致拉索过早疲劳破坏,预应力过小则无法保证结构的稳定性,因此需要经过反复计算和优化,找到最佳的预应力平衡点。同时要对刚性支撑结构进行强度和稳定性校核,确保其能够有效承担柔性拉索传递的荷载,并在各种工况下保持稳定。对于中间支撑结构,需要合理设计其间距和形式,间距过大可能导致柔性拉索下垂度过大,影响光伏组件的安装角度和发电效率;间距过小则会增加材料用量和成本,还需考虑结构的整体稳定性,通过设置合理的支撑体系和约束条件,防止结构发生整体失稳现象,如侧倾、扭转等。

3.4 安装方式设计

柔性光伏支架的安装方式设计应充分考虑施工的便捷性、安全性和高效性。在安装前,需要对施工现场进行详细的勘察和测量,根据设计要求确定各部件的安装位置和尺寸。对于柔性拉索的安装,通常采用分段张拉的方式,先将拉索的一端固定在端部锚固结构上,然后通过张拉设备逐步施加预应力,将拉索拉伸至设计长度,并固定另一端^[3]。在张拉过程中,要严格控制张拉力的大小和张拉顺序,确保拉索受力均匀,避免出现局部应力集中现象。刚性支撑结构的安装则需要保证其垂直度和水平度,可采用吊装、拼接等方式进行安装。在安装过程中,要注意各部件之间的连接顺序和连接质量,确保连接牢固可靠。为了提高安装效率,可以采用模块化安装方式,将部分部件在工厂进行预制和组装,然后运输到施工现场进行整体安装,减少现场施工时间和工

作量。此外,还应制定详细的安装安全操作规程,配备必要的安全防护设备,确保施工人员的人身安全。

3.5 智能控制与维护保养设计

智能控制与维护保养设计是提升柔性光伏支架运行效率和可靠性的重要手段。通过在支架系统中安装各类传感器,如位移传感器、应力传感器、风速传感器等,实时监测支架结构的变形、应力状态以及环境参数的变化。将传感器采集到的数据传输至智能控制系统,系统通过数据分析和处理,能够及时发现支架结构存在的潜在问题,如拉索松弛、结构变形过大等,并发出预警信号,提醒维护人员进行检查和处理。在维护保养方面,应制定科学合理的维护计划,定期对支架系统进行检查和维护。包括检查柔性拉索的张力是否正常、连接部件是否松动、刚性支撑结构是否出现腐蚀等情况。对于发现的问题,及时进行修复和处理,确保支架系统始终处于良好的运行状态,还可以利用智能化技术,如无人机巡检、机器人维护等,提高维护效率和准确性,降低人工维护成本和劳动强度。

4 柔性光伏支架结构设计的优化策略

4.1 新材料应用与研发方向

新材料的应用和研发是提升柔性光伏支架性能的重要途径。在柔性拉索材料方面,未来应加大对高性能纤维材料的研发力度,进一步提高纤维材料的强度、模量和耐疲劳性能,同时降低生产成本,使其能够更广泛地应用于柔性光伏支架领域。例如,研发新型的复合纤维材料,将不同纤维的优点相结合,开发出具有更高综合性能的柔性拉索。在刚性支撑结构材料方面,探索新型轻质、高强度材料的应用,如新型铝合金材料、镁合金材料以及纤维增强复合材料等。这些材料具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点,能够有效降低支架结构的自重,提高结构的抗震性能和耐久性,同时减少对环境的影响,还应加强对材料表面处理技术的研究,提高材料的防腐性能和使用寿命。

4.2 安装施工工艺的改进措施

安装施工工艺的改进能够有效提高柔性光伏支架的安装效率和质量。一方面,可以进一步优化安装流程,采用更先进的施工组织方法,如流水作业、平行作业等,合理安排施工顺序和施工时间,减少施工过程中的等待时间和交叉作业干扰,提高施工效率。另一方面,研发和应用新型的安装设备和工具,如自动化张拉设

备、高精度测量仪器等,提高安装的精度和效率,降低人工操作的难度和误差。同时,加强施工人员的培训和管理,提高施工人员的专业技能和安全意识。通过定期组织培训和技术交流活动,使施工人员掌握最新的安装技术和工艺要求,严格按照施工规范和操作规程进行施工,确保安装质量和施工安全。另外,还可以建立施工质量追溯体系,对施工过程中的每个环节进行记录和监控,便于出现问题时及时追溯和整改。

4.3 标准化体系建设的建议

标准化体系建设对于推动柔性光伏支架产业的健康发展至关重要。首先,应加快制定和完善柔性光伏支架相关的国家标准和行业标准,明确支架的设计、制造、安装、验收等各个环节的技术要求和质量标准,为产业发展提供统一的规范和依据。标准内容应涵盖材料性能指标、结构设计方法、施工工艺要求、安全检测标准等方面,确保标准的全面性和实用性^[4]。其次,加强标准化技术委员会的建设,组织行业内的专家、企业代表等共同参与标准的制定和修订工作,提高标准的科学性和先进性。同时建立标准实施的监督和评估机制,加强对标准执行情况的监督检查,确保标准能够得到有效落实,还应积极参与国际标准的制定和交流,提高我国在柔性光伏支架领域的国际话语权,推动我国柔性光伏支架产业走向国际市场。

结束语

综上所述,柔性光伏支架结构设计需综合多方面因素。通过遵循设计原则、把握设计要素及实施优化策略,能有效提升支架性能与经济效益。随着研究深入与技术进步,柔性光伏支架有望在复杂场景中发挥更大作用,推动光伏产业向更高效、可持续方向发展,助力全球能源转型。

参考文献

- [1]周润.柔性光伏支架结构设计探讨[J].能源与节能,2023(1):22-24,170.
- [2]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,2021,000(003):202-204.
- [3]赵亮.张洪华.陈国平.新型太阳能光伏支架结构设计及性能分析[J].机械设计与制造,2021,2(48):45-49.
- [4]杨建.刘磊.朱小明.光伏电池组件倾角优化对能源产出的影响研究[J].太阳能学报,2020,41(7):1025-1030.