

光伏电站支架结构在风致振动下的疲劳寿命预测

张 意

杭州益瑞电力科技有限公司 浙江 杭州 311115

摘 要：光伏电站支架在风致振动下易产生疲劳损伤，威胁电站安全与经济效益。本文构建多维度模型体系，结合材料性能、应力分布及损伤演化分析，实现全生命周期疲劳寿命预测。通过关键参数校准、有效性验证与结构优化策略，提升预测精准度，延长支架安全服役周期，为光伏电站设计与运维提供科学支撑，保障电站长期稳定运行。

关键词：光伏电站支架；风致振动；疲劳寿命预测

引言：光伏电站支架长期处于户外风场环境中，风致振动（如涡激振动、驰振）产生的交变应力会引发金属材料微观损伤，导致疲劳裂纹萌生与扩展。准确预测其疲劳寿命，可提前发现焊缝、连接节点等关键部位的损伤风险，优化检修周期与加固方案，降低运维成本，同时推动高韧性材料研发与结构动力特性优化，全面提升电站运行安全性与经济性。

1 光伏电站支架结构风致振动疲劳寿命预测的重要性

光伏电站支架结构风致振动疲劳寿命预测具有重要意义，主要体现在以下几个方面：（1）保障光伏电站的安全稳定运行：光伏电站通常处于户外环境，支架结构长期受到风荷载作用，容易产生风致振动，如果不能准确预测其疲劳寿命，支架结构可能在运行过程中出现疲劳损伤甚至破坏，导致光伏组件掉落、损坏，影响光伏电站的正常发电，甚至引发安全事故。通过对支架结构风致振动疲劳寿命进行预测，可以提前发现潜在的安全隐患，及时采取加固、维修等措施，确保光伏电站的安全稳定运行。（2）提高光伏电站的经济效益：准确预测光伏电站支架结构的风致振动疲劳寿命，可以合理安排维护计划和更换周期，避免因过度维护造成资源浪费，也能防止因维护不及时导致支架结构过早损坏而增加更换成本。这样可以在保证光伏电站正常运行的前提下，降低运维成本，提高经济效益。（3）推动光伏技术的发展：对光伏电站支架结构风致振动疲劳寿命的研究，有助于深入了解支架结构在风荷载作用下的力学性能和疲劳损伤机理，这为新型支架结构的设计和优化提供了理论依据，促进了光伏支架技术的创新和发展。研发出更具抗风性能、更长疲劳寿命的支架结构，能够提高光伏电站的整体性能和可靠性，推动光伏产业的可持续发展^[1]。光伏电站支架结构风致振动疲劳寿命预测对于保障光伏电站的安全稳定运行、提高经济效益以及推动光伏技术的发展都具有不可忽视的重要作用。它是光伏电站建设和运

行过程中不可或缺的重要环节，值得我们给予足够的重视和深入的研究。

2 光伏电站支架结构风致振动与疲劳损伤的基础分析

2.1 支架结构的力学特性与结构组成

光伏电站支架结构的力学特性与结构组成需结合工程实际与材料性能综合考量。支架通常由立柱、横梁、斜撑及连接件构成，形成空间刚架体系以承受风载、雪载及自重作用；立柱作为主要承力构件，需具备足够的抗压与抗弯强度，其截面形状（如H型、圆管）直接影响风阻系数与应力分布。横梁则承担光伏组件的横向荷载，需通过合理跨度与截面设计确保挠度控制在安全范围内。结构连接部位是力学特性分析的关键，焊接节点需考虑焊缝强度与应力集中问题，螺栓连接则需验证抗剪与抗拉性能；斜撑的布置可增强整体稳定性，减少风振时的位移幅值。材料选择方面，钢材因高强度与可焊性成为主流，但需关注其疲劳性能与防腐处理，避免长期暴露导致的性能退化。风致振动下，支架结构需承受交变应力作用，立柱与横梁的节点区域易产生应力集中，需通过局部加强或优化截面设计降低疲劳风险；结构整体需具备良好的动力特性，避免与风载频率产生共振，导致振幅放大与疲劳损伤加剧。因此，支架设计需在强度、刚度与稳定性之间寻求平衡，确保在复杂风场环境中长期安全运行。

2.2 风致振动的作用机制与响应特性

风致振动对光伏电站支架结构影响深远，了解其作用机制与响应特性是预测疲劳寿命的基础。（1）作用机制：风作用于支架结构会产生不同类型的力。风流经结构表面形成压力分布，产生静压力；风速不稳定形成的脉动风，会引发交变动力荷载，使支架结构振动。振动频率与风速、风向和结构固有频率相关，当脉动风频率接近或等于结构固有频率时，会发生共振，显著增大振动幅度，严重影响结构安全。（2）响应特性：支架结构

在风致振动下的响应复杂。位移响应方面,结构会在风作用下位移,大小和方向随风速、风向变化,强风时位移可能超设计范围。加速度响应反映振动剧烈程度,较大加速度使结构承受更大惯性力,加速疲劳损伤积累;而且,风特性的不确定性导致风致振动响应具有随机性,难以精确预测。(3)影响因素:风致振动的作用机制和响应特性受多种因素影响^[2]。支架结构自身的形状、尺寸和刚度等特性,会影响其对风的响应,不同形状结构的风绕流情况不同,压力分布和振动特性也不同。环境因素如当地平均风速、湍流强度等也很关键,风速大、湍流强度高的地区,支架受影响更明显。

2.3 疲劳损伤的产生原理与演化规律

光伏支架疲劳损伤源于交变应力对材料微观结构的持续作用,风致振动产生的拉压、弯曲等循环应力,会在金属晶粒间引发滑移,形成初始微裂纹。这些裂纹在应力集中区域(如焊缝热影响区、螺栓孔边缘)优先萌生,其扩展过程遵循断裂力学规律,裂纹尖端应力强度因子超过材料断裂韧性时,裂纹加速扩展,最终导致结构失效。疲劳损伤演化具有阶段性特征,初期裂纹萌生阶段,微裂纹在局部应力集中处形成,尺寸通常在微米级,难以通过常规检测发现;中期稳定扩展阶段,裂纹在交变应力驱动下沿晶界或穿晶扩展,长度增长速率与应力幅值呈正相关;后期快速失效阶段,裂纹扩展至临界尺寸,剩余截面承载能力骤降,结构突然断裂。材料特性与环境因素共同影响损伤演化速率,高强度钢材虽能提升承载能力,但可能因韧性不足加速裂纹扩展;低合金钢通过细化晶粒可延缓裂纹萌生。环境腐蚀与温度变化会降低材料疲劳极限,例如盐雾环境中的电化学腐蚀会加速裂纹扩展,温差引起的热应力可能叠加机械应力,加剧疲劳损伤。因此,疲劳损伤预测需综合考虑材料性能、应力水平及环境作用的综合效应。

2.4 风致振动与疲劳寿命的关联机制

风致振动通过交变应力直接驱动疲劳损伤演化,其与疲劳寿命的关联机制需多维度解析。振动模式(如涡激振动、驰振)决定应力循环特征,高幅振动会显著加速微裂纹萌生与扩展进程,缩短支架疲劳寿命。例如,低频大振幅振动易在焊缝热影响区形成应力集中,诱发裂纹早期萌生,降低结构抗疲劳能力。应力分布与裂纹扩展路径存在空间关联性,振动引发的动态应力在节点连接等结构薄弱部位叠加,形成高应力梯度区域,促使裂纹沿晶界或穿晶方向扩展,削弱结构整体抗疲劳阈值。材料性能与振动频率存在动态匹配关系,高强度钢材虽能提升静态承载力,但高频振动可能激发其脆性倾

向,加速裂纹扩展;韧性材料则通过塑性变形吸收能量,延缓疲劳失效进程。环境因素与振动响应存在耦合效应,风速波动、温度变化等环境参数会改变振动幅值与频率,同时影响材料疲劳极限。如低温环境降低钢材韧性,叠加高频振动可能引发脆性断裂;盐雾腐蚀通过削弱材料表面性能,加速疲劳损伤累积。因此,需从动态应力、材料特性、环境作用三维度综合解析风致振动与疲劳寿命的关联机制,为支架抗疲劳设计提供科学依据。

3 光伏电站支架结构疲劳寿命预测的方法与优化路径

3.1 疲劳寿命预测的核心模型构建

光伏支架疲劳寿命预测需构建多维度模型体系,精准量化振动应力与材料损伤关联。模型构建需从材料性能、应力分布及损伤演化三方面系统推进,形成闭环预测框架。(1)材料疲劳特性是模型基础支撑:需通过标准试件实验获取支架材料应力-寿命曲线,明确不同应力幅值下疲劳寿命分布规律。同时考虑实际工况中应力比、加载频率对疲劳极限的影响,修正实验室数据与现场条件差异,确保模型反映真实服役环境。(2)应力分析:需结合结构动力学特性,采用有限元方法模拟风致振动下应力响应,识别立柱与横梁连接节点等高应力区域。通过模态分析确定结构固有频率,避免与风载频率耦合引发共振放大效应,为损伤累积提供准确应力输入条件。(3)损伤演化模型:需融合多因素耦合效应,在传统迈纳线性累积损伤理论基础上,纳入环境腐蚀、温度变化等外部因素对疲劳极限的削弱作用。例如盐雾环境加速金属表面腐蚀,降低裂纹萌生阈值;温差变化引发热应力与机械应力叠加,加剧疲劳损伤速率。通过多场耦合模型实现全生命周期损伤演化预测,提升寿命评估精准度^[3]。模型构建需持续迭代优化,结合现场监测数据修正理论假设,形成从设计到运维的全链条预测能力。

3.2 预测模型的关键参数选取与校准

在光伏电站支架风致振动疲劳寿命预测中,关键参数选取与校准是提升模型精准度的核心。材料性能参数需涵盖支架用材的力学特性,如钢材屈服强度、铝合金疲劳极限及韧性指标,直接影响循环风载下裂纹萌生与扩展速率。风荷载参数需细化至风速概率分布、风向变化频率、湍流强度及风攻角等要素,通过现场实测或计算流体动力学模拟获取,以准确刻画风致振动激励特征。结构动力特性参数如固有频率、模态阻尼比、振型等,需通过锤击法或环境激励法实测,反映支架、基础与光伏组件系统的振动耦合特性。参数校准需结合现场监测与实验室测试,现场布设风速仪、加速度计、应变片等设备,实时采集风载与结构响应数据,通过雨流计数

法统计疲劳损伤，与模型预测对比以调整参数；实验室开展材料疲劳试验、构件振动台试验，获取应力-寿命曲线、裂纹扩展速率等关键数据，用于校准材料本构模型与损伤累积模型。科学选取并精准校准参数，可提升疲劳寿命预测可靠性，为支架维护决策、结构优化及光伏电站安全运行提供科学支撑，降低疲劳失效导致的发电损失与运维成本，保障光伏发电系统长期稳定高效运行。

3.3 预测方法的有效性验证与改进

光伏支架疲劳寿命预测方法需通过多维度验证确保可靠性，有效性验证首先依赖实验数据与模型预测的对比分析，例如通过风洞试验获取结构振动响应特性，与有限元模拟结果进行误差量化，评估模型在风速、风向变化下的预测精度。同时，现场监测数据（如应变片、加速度传感器实时采集）可反向校准模型参数，识别高应力区域与损伤演化路径的一致性。改进路径需聚焦模型动态修正与多因素耦合，传统线性累积损伤理论在复杂载荷谱下可能低估损伤速率，需引入非线性损伤模型或概率统计方法提升预测鲁棒性；环境因素（如温度波动、盐雾腐蚀）对材料疲劳极限的影响需通过加速寿命试验量化，并融入模型修正项。例如，温差变化引发的热应力与机械应力叠加效应，可通过热-力耦合模型动态调整损伤累积速率。算法优化方面，机器学习技术可挖掘海量监测数据中的损伤特征，构建数据驱动的疲劳寿命预测模型，提升对非线性损伤演化过程的捕捉能力。持续迭代机制则通过定期更新模型参数，结合现场运维数据形成闭环验证与改进流程，确保预测方法始终适应实际工况变化，提升全生命周期管理的科学性。

3.4 基于预测结果的结构抗疲劳优化策略

结构抗疲劳优化需以疲劳寿命预测结果为导向，精准定位薄弱环节并实施针对性改进策略，从多维度提升支架抗疲劳能力以延长安全服役周期。局部强化高应力区域方面，通过有限元分析精准识别立柱与横梁连接节

点、焊缝热影响区等应力集中部位，采用局部加厚钢板或增设加强筋的方式提升承载能力，有效降低应力幅值以延缓裂纹萌生。例如，在焊缝周边区域增加补强板，可显著分散应力并减少局部损伤累积，提升结构抗疲劳性能。优化材料选择与表面处理方面，根据预测结果中的损伤演化规律，选用高韧性、耐腐蚀的钢材如低合金高强度钢，并配合热浸镀锌或喷涂防腐涂层，提升材料在复杂环境中的抗疲劳性能。表面处理可减少腐蚀介质渗透，降低环境因素对疲劳极限的削弱作用，延长材料使用寿命。调整结构动力特性以避免共振方面，通过模态分析优化支架截面形状与连接方式，调整固有频率远离风载频率带以避免共振放大效应^[4]。例如，采用变截面立柱设计，既可减轻自重又能改变振动模态，降低风致振动响应幅值，从源头减少疲劳损伤累积，实现结构抗疲劳能力的全面提升。

结束语：未来，研究可深入探索机器学习算法（如深度学习、神经网络）在疲劳损伤演化预测中的精细化建模能力，结合实时监测数据实现动态预测。同时，聚焦新型抗疲劳材料研发（如高强度合金、复合材料），通过材料性能优化与结构动力特性协同设计，推动光伏支架向轻量化、高可靠性方向升级，最终实现光伏产业全生命周期成本降低与发电效率提升的双重目标。

参考文献

- [1]李磊.基于多尺度模拟的疲劳寿命预测研究[文献标识码].材料科学与工程, 2020, 38(5): 78-85.
- [2]赵阳.人工智能在疲劳寿命预测中的应用[文献标识码].计算机工程与应用, 2021, 57(7): 144-151.
- [3]张永杰.光伏电站支架基础型式对比分析及选型措施[J].大众标准化,2021,卷首语(13):79-81.
- [4]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.