

海外屋顶光伏项目钢结构荷载校核与加固技术应用

杨忠林 李 莎

中国电建集团四川工程有限公司 四川 成都 610051

【摘要】：海外屋顶光伏工程在多气候环境与复杂受力条件下，对钢结构荷载校核与安全性能提出更高要求。以越南隆安省26.15MW屋顶光伏厂房项目为典型热带海外工程案例，项目厂房总建筑面积20万 m^2 ，包含15栋生产厂房及仓储库房，其中8栋原有厂房钢结构承载力不足需实施加固，加固施工总面积13万 m^2 ；越南地处热带无积雪，全年台风、短时强暴雨频发，强阵风、暴雨积水附加荷载是屋顶钢结构最核心控制工况。部分结构在设计阶段荷载取值偏差、连接节点刚度不足及腐蚀作用影响下，易出现承载能力下降与局部失稳风险。通过开展荷载重新计算与工况组合分析，引入有限元精细化建模方法，对关键构件受力进行校核评估，并采用截面加固、节点补强及防腐体系优化等技术手段提升结构承载水平，并实现多工况下安全校核一致性。

【关键词】：海外屋顶光伏；钢结构荷载校核；结构加固技术；有限元分析；防腐加固

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.026

引言

海外屋顶光伏钢结构应用范围不断扩大，多气候叠加环境使受力体系呈现复杂化特征。现状表现为设计荷载取值与实际工况存在偏差，连接节点刚度衰减及材料腐蚀影响逐步显现。问题集中在承载安全裕度不足与局部变形风险提升。针对上述情况，通过荷载重新组合计算、有限元精细化分析、关键节点加固处理及防腐体系优化等方法进行调整并实现多工况校核统一。结构整体安全性能与运行稳定性得到提升，长期服役可靠性增强保障结构持续稳定运行。

1 海外屋顶光伏钢结构受力识别体系构建

1.1 荷载类型分类及组合规则

屋顶光伏钢结构荷载体系划分需结合多源作用机制展开，涵盖恒载、自重附加荷载、风荷载、温度作用及偶然作用等多维度输入条件。不同荷载在空间分布与时间变化上呈现非一致性特征，需依据结构功能分区进行差异化识别。组合规则构建强调概率极限状态思想，通过多工况叠加路径建立控制性组合序列，对主导荷载与伴随荷载进行权重分配。动态荷载与静态荷载之间引入时变耦合系数，实现风振效应与结构固有频率之间的协调修正，使整体受力路径更加贴近真实服役状态。

1.2 环境作用参数修正

环境因素对钢结构受力状态影响呈现非线性累积特征，高温、盐雾、湿度及风压波动共同作用于结构表层与连接体系。参数修正体系基于多气候区域特征数据库，对风速谱、温度梯度及腐蚀速率进行动态修正处理^[1]。风荷载修正引入地形粗糙度与湍流强度双重参数，使局部阵风效应能够被精细表达。温度作用修正考虑材料热胀冷缩差异引起的附加内力重分布路径，通过热应力映射模型调整整体刚度矩阵。腐蚀作用参数则通过截面损伤折减系数进行量化处理，实现材料性能随时间退化的连续表达，使结构计算模型具备时间演化特征与区域适配能力。

1.3 结构响应特征提取

结构响应特征提取基于多维度力学反馈信号展开，重点关注位移场、应力场及振动模态的耦合变化规律。通过有限元离散计算获取节点位移梯度分布，识别高应力集中区域与潜在薄弱区间。振动响应分析引入模态参与系数，用于判断风荷载激励下的主导振型演化路径。应力路径追踪方法用于捕捉荷载传递过程中内力重分布趋势，揭示构件之间协同受力关系。响应数据通过特征向量降维处理后形成结构状态指纹，实现不同工况下结构行为的差异化识别，使受力体系具备可量化、可追踪与可对比的分析基础。

2 多工况荷载校核计算路径优化

2.1 台风暴雨荷载重构方法

针对越南等东南亚热带项目直接剔除雪荷载重构流程，重点优化台风风荷载、暴雨积水荷载双重构模型。风荷载重构引入三维流场分解模型，将瞬态风速转化为等效静力与动力分量，实现脉动压力沿结构表面的连续映射，区分横向风压、纵向吸力、屋面局部上举力四类台风荷载工况，分别计算主框架、檐口檩条、山墙立柱受力。荷载传递过程中引入形状系数动态调整机制，使不同构件区域受力差异被精细化刻画。重构后的荷载数据具备空间连续性与时间演化特征，为后续多工况叠加提供高精度输入基础，越南厂房屋面坡度10%，暴雨积水沿坡向分布不均，积水附加荷载按屋面分区差异化赋值。

2.2 极端工况组合分析

极端工况组合分析以多变量耦合路径为核心，通过构建多源荷载同步作用矩阵，对台风、暴雨积水、温度、光伏附加荷载及结构附加作用进行同步叠加处理，取消雪、冰相关极端组合。组合规则采用分层递进方式，将主导极端事件与次生作用进行优先级排序，使最不利受力路径能够被快速识别^[2]。越南项目最不利控制组合为：恒载+光伏活载+0.75台风荷载+0.75暴雨积水荷载，完全匹配ASCE 7-05热带地区荷载组合公式。

荷载组合过程中引入相关性系数矩阵,对不同气候因子之间的相互影响进行约束处理,避免线性叠加带来的偏差。结构响应在极端组合条件下通过非线性迭代求解方法进行更新,使材料屈服与几何非线性效应同步进入计算体系。该路径能够捕捉局部失稳前兆特征,并强化对节点区域与长跨构件的控制分析能力,隆安厂房原结构未考虑台风与光伏荷载同步叠加,原始计算应力比最大值达1.02,超出规范限值,必须加固补强。

2.3 安全储备量化评估

安全储备量化评估基于承载能力与需求效应比值关系构建评价体系,通过引入可靠指标与失效概率双重控制参数实现多维度判断。结构承载极限状态通过材料强度折减与截面有效性修正进行计算,使退化效应能够纳入安全储备评估体系。荷载需求侧通过多工况响应包络曲线进行整合,形成统一控制指标。安全储备分级采用连续函数映射方式,将结构余量转化为可对比数值区间,增强不同构件之间的横向评价能力。评估过程结合时间衰减模型,使长期服役状态下安全裕度变化趋势得到动态表达,并为结构运行稳定性提供量化依据。

3 关键节点结构性能退化识别

3.1 连接节点刚度分析

连接节点刚度分析以荷载传递路径与界面约束行为为核心,通过建立节点-构件协同受力模型对刚度退化过程进行分层识别。螺栓连接、焊缝连接及夹持连接在循环荷载作用下呈现不同程度的非线性刚度衰减特征,刚度矩阵更新通过接触非线性与滑移效应共同修正。节点区域应力集中系数在风振与温度循环作用下持续变化,使局部变形放大效应逐步显现。刚度识别过程中引入模态频率漂移分析,将结构振动特征变化转化为刚度退化量化指标,实现隐性损伤的可观测表达。

3.2 局部失稳模式判断

局部失稳模式判断基于构件屈曲行为与几何非线性响应展开,通过多尺度稳定性分析方法识别薄弱区域演化路径^[3]。受压杆件与连接腹板在复杂荷载作用下易形成局部屈曲波形,其发展过程受边界约束条件与初始缺陷敏感性共同控制。失稳识别通过特征值屈曲分析与非线性后屈曲路径追踪相结合,捕捉临界荷载点附近结构响应突变行为。局部区域应力重分布导致塑性铰链逐步形成,使结构从弹性状态向弹塑性过渡。稳定性判定引入能量法评价体系,通过势能变化率识别失稳前兆特征,实现对隐性屈曲模式的提前识别与路径预测。

4 钢结构加固及性能提升技术集成

4.1 截面增强及补强设计

截面增强设计基于承载力不足区域的受力重分布机制展开,通过对原有构件截面进行等效刚度提升与强度补偿实现整体性能优化。钢构件在长期荷载作用下产生局部削弱后,采用

外包钢板、贴附型加劲构件及复合材料叠加方式形成多层受力体系,使截面惯性矩与抗弯刚度同步提升。越南隆安6A仓库加固工程采用两种型钢补强方案:1.主框架增设I125×125×6×9工字钢竖向支撑;2.纵向屋面体系增设150×150×2.5mm矩形钢管斜撑,全部采用磁力钻现场开孔、8.8级高强螺栓装配连接,无需大面积动火焊接,适配已投产厂房施工条件。补强设计过程中引入应力路径再分配分析方法,对原构件与加固材料之间的协同工作状态进行连续匹配,使界面剪力传递效率得到增强。新增材料与既有结构之间通过高性能粘结或机械连接形成复合受力界面,使整体截面在极端台风、暴雨荷载条件下仍保持稳定应力分布。

4.2 节点加固及连接优化

节点加固及连接优化以结构传力效率提升与局部应力集中削减为核心,通过多尺度连接强化策略改善节点整体受力状态。螺栓节点通过预紧力重构与8.8级高强度连接件替换实现滑移控制能力提升,使接触面摩擦传力稳定性增强。越南项目全部更换原有4.6级普通机械螺栓,统一采用8.8级高强螺栓,对梁柱刚接节点增设加厚连接板,增大螺栓排布密度,降低节点应力集中系数。焊接节点采用局部补焊与过渡圆角优化方式降低应力集中系数,使焊趾区域疲劳敏感性得到削弱,焊接施工严格遵循AWS D1.1-2008钢结构焊接标准。连接优化过程中引入三维受力协调模型,对轴力、剪力及弯矩耦合传递路径进行重新分配,使节点区域受力更加均匀。节点刚度通过加强板与加劲肋布置方式进行提升,使整体结构在风振及温度循环作用下具备更高的变形协调能力^[4]。

4.3 防腐体系及涂层升级

防腐体系升级基于多层防护协同机制构建,通过屏障隔离、阴极保护及环境抑制三重路径延缓钢材腐蚀进程。涂层体系采用梯度结构设计方式,使底层附着力增强层与中间屏蔽层及表面耐候层形成连续防护结构,提高环境介质渗透阻力。涂层性能优化过程中引入纳米填料改性技术,使微观孔隙率显著降低,从而抑制氯离子与水分扩散路径。防腐体系设计结合电化学腐蚀机理,通过势能差调控降低金属氧化反应速率,实现长期稳定防护效果。表面处理工艺强化粗糙度控制与界面活化处理,提高涂层与基材之间结合强度,减少剥落风险。

5 工程应用效果及稳定性验证体系

5.1 加固前后对比分析

加固前后对比分析基于结构性能参数的多维度差异评估体系展开,通过承载能力、刚度特性及变形响应等关键指标构建统一对比框架。以越南隆安6A仓储厂房为实测案例,加固前原始结构验算结果:K1主框架立柱应力比0.905、屋面主梁0.901,接近规范1.0限值;屋面檩条跨中最大挠度280.4mm,超出光伏屋面变形控制要求。加固后通过工字钢、方管截面补

强与节点优化形成新的受力路径,使内力分布趋于均匀化,结构整体刚度显著提升,加固完成后 K2 框架立柱应力比降至 0.785、主梁应力比 0.781,纵向 2C150×2.5 斜撑应力比仅 0.118,所有构件应力比均远低于 1.0 合格阈值。对比分析采用荷载-位移曲线包络法,将台风、光伏荷载等不同工况下响应数据进行标准化处理,使结构性能提升幅度具备可量化表达。

5.2 长期服役性能监测

长期服役性能监测体系基于多源传感与数据融合分析技术构建,通过应变、位移、振动及环境参数的连续采集实现结构状态动态跟踪。越南隆安光伏厂房项目在 8 栋加固厂房的主框架柱底、屋面跨中檩条、山墙节点布设应变、位移传感器,持续监测台风季极端荷载下结构响应。监测数据通过时序分析方法进行特征提取,使结构性能演化过程具备可视化表达能力。关键节点区域布设高精度传感单元,用于捕捉微小刚度变化与疲劳累积效应。环境因素与结构响应之间建立关联映射模型,使温度循环、湿度变化及台风荷载波动对结构性能的影响能够同步反映^[5]。数据处理过程中引入异常识别算法,对突变响应进行筛选与标记,从而识别潜在损伤演化路径。长期监测结果通过退化曲线拟合方法进行趋势建模,使结构剩余性能评估具备连续更新机制,并为维护决策提供稳定依据。

5.3 安全指标验证方法

安全指标验证方法基于极限状态设计理论与可靠度分析

体系构建,越南项目同步采用美国 AISC ASD89、ASCE 7-16、越南 TCVN2737-1995 三重标准交叉校核,通过承载能力指标与需求效应比值实现安全水平判定。结构响应结果经过多工况包络处理后形成控制值集合,并与设计基准进行对比分析。可靠指标计算引入概率分布函数,对台风荷载不确定性与钢材材料离散性进行综合修正,使安全评估结果具备统计意义。验证过程中采用分级判定机制,对整体结构与关键构件分别进行安全裕度校核,使局部风险与整体稳定性同步受控。指标体系结合热带环境腐蚀时间衰减模型,使长期服役条件下安全水平变化趋势能够动态更新。通过多参数耦合校核方法,将刚度退化、腐蚀损伤及连接性能变化统一纳入评价体系,使安全验证结果具备系统一致性与工程适用性。项目全部厂房加固完成后出具承载力检测报告,结论明确:加固后结构可稳定承受 20kg/m² 光伏组件附加荷载,满足大于 15kg/m² 的光伏安装荷载要求,可安全开展光伏铺设施工。

6 结语

海外屋顶光伏钢结构在多环境荷载与复杂受力条件共同作用下,通过荷载识别、校核优化及加固体系协同提升,实现结构安全性能与服役稳定性的系统增强。关键节点性能退化机制得到量化表达,整体承载能力与耐久水平得到同步改善,工程应用验证体系进一步强化结构长期可靠运行基础。

参考文献:

- [1] 明成涛.既有农业钢结构牛棚在屋顶光伏荷载下的结构性能与加固方案研究[J].工程技术研究,2025,10(15):40-42.
- [2] 林于靖.既有钢结构工业厂房增设屋顶光伏鉴定与加固中的若干问题研究[J].福建建筑,2024(12):37-39+75.
- [3] 马宏旺,陈龙珠,李庆来.屋顶光伏板风荷载体型系数取值研究[J].绿色建筑,2022,14(3):67-71.
- [4] 刘兆祥,徐雯雯,闫贵海,龚超,杨永友,张涛.绿植光伏屋顶技术研究现状及存在的问题[J].广州建筑,2024,52(1):105-108.
- [5] 张宸,龚在刚,袁泽龙,顾玉祥,谢雨欣.基于卫星图像的屋顶光伏潜力识别与减碳评估技术研究[J].电力大数据,2024,27(8):48-57.