基于全寿命周期的光伏支架结构设计与制造技术研究

朱志岩

（江苏国电新能源装备有限公司，江苏 常州 213300）

摘 要 光伏支架作为光伏电站的重要承载结构，其设计水平与制造质量直接影响发电系统安全稳定运行及全寿命周期经济效益。本文针对光伏支架全寿命周期的设计需求，分析服役环境、寿命影响因素、结构设计原则，结合结构优化、材料选型、制造工艺、防腐维护等关键技术，建立覆盖设计、制造、运行维护全过程的技术模式，并且通过工程应用来对结构性能、制造质量以及综合效益进行评价，以期为提高光伏支架的耐久性、运行可靠性、资源利用效率、工程建设质量提供技术参考。

关键词 光伏支架；全寿命周期；结构设计；制造技术；耐久性

中图分类号：TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.006

0 引言

光伏发电装机规模持续扩大，光伏支架长期处在风荷载、雪荷载、温度变化、湿热腐蚀等复杂环境中，其结构安全、耐久性能和制造质量直接对电站运行稳定性、全寿命周期成本控制有影响。传统设计模式更多关注初始建设阶段，对于服役性能、维护管理及寿命评价统筹不足，容易致使后期运维成本增加、结构性能衰减速度加快。全寿命周期理念融入光伏支架结构设计与制造过程，有助于统筹材料性能、结构优化、工艺控制、运行维护，实现全阶段技术协同，推动光伏支架朝着高可靠、长寿命、低成本的方向发展。

1 光伏支架全寿命周期设计需求分析

1.1 光伏支架全寿命周期设计理念与技术要求

全寿命周期设计将光伏支架的时间轴线划分为制造加工、物流运输、现场安装、运行维护、退役处置五个阶段，各阶段性能目标与约束条件存在显著差异。在制造阶段重点在于尺寸精度、焊接质量，在运输阶段着重关注构件刚度、包装防护，在安装阶段强调装配效率与临时稳定，在运维阶段聚焦腐蚀控制、疲劳损伤，在退役阶段涉及材料回收、残值评估。全寿命周期设计要求在设计初始阶段即统筹各阶段的技术需求，将后期运维数据和制造经验反向导入设计环节，形成闭环反馈机制[1]。核心技术要求包括建立与设计基准期匹配的荷载取值体系、明确构件重要性分级并分配差异化安全裕度、预留运维检修所需的通道空间与可更换节点接口。

1.2 光伏支架服役环境及寿命影响因素分析

光伏支架服役环境具有显著的地域差异性与多因素耦合特征，内陆荒漠地区主要受风沙磨蚀、极端温度循环的影响，风荷载长时间脉动致使连接节点出现累积疲劳损伤，日温差与年温差交替导致构件热胀冷缩产生的次生应力不可忽略。沿海及近海区域面临着高浓度氯离子的侵蚀，盐雾沉降在支架表面形成电解液薄膜，加快镀锌层的电化学腐蚀进程，工业区周边的酸性气体与冷凝水结合生成酸性溶液，对镀层、基体金属构成持续的腐蚀威胁[2]。风致疲劳是影响柔性支架寿命的关键力学因素，温度变化主要影响紧固件预紧力保持能力，地基沉降差异让支架体系产生附加内力重分布。不同服役环境对应的腐蚀性等级与镀锌层厚度要求见表1。

1.3 全寿命周期导向下光伏支架结构设计原则

在全寿命周期导向下的结构设计原则中，将时间维度引入传统承载能力与正常使用两类极限状态之外，增设耐久性极限状态作为独立的设计控制条件。在此原则基础上，在设计阶段就要明确构件在服役期间的性能退化轨迹，并据此来确定初始性能裕量，结构设计要遵循可检测、可到达、可更换这三项准则，保证关

作者简介：朱志岩（1979-），男，本科，工程师，研究方向：光伏支架结构设计。

表 1 不同服役环境的腐蚀性等级与镀锌层厚度要求

环境类型	腐蚀性等级	推荐镀锌层厚度（μm）	典型区域
内陆干燥	C2	≥ 65	西北荒漠与戈壁
城镇工业区	C3	≥ 85	工业园区及周边
沿海潮湿	C4	≥ 100	近海 5 km～10 km 范围
高盐雾海洋	C5	≥ 120	离海小于 1 km 及海上

（注：镀层厚度依据《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》（GB/T 13912-2020）及《钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》（ISO 1461:2022）对大气腐蚀性等级的分类要求确定。C2 等级环境下镀锌层厚度不小于 65 μm 可满足 25 年设计基准期要求；热镀锌工艺可实现平均 85 μm 镀层厚度达到 C5 等级防腐要求；在 C5 腐蚀等级环境下，锌铝镁镀层测算的 27 年腐蚀深度为 20.5 μm ~ 27.3 μm，实际工程中推荐使用 600 g/m^2 镀层重量。）

键节点、易损构件在运维期间具备可维护性。荷载取值方面，要区分施工阶段临时荷载、运行期常规荷载、极端灾害荷载，分别给予不同重现期与分项系数[3]。构件重要性分级制度将支架构件分为主承载构件、次承载构件、辅助构件三个等级，针对不同等级制定不一样的疲劳设计方法与腐蚀裕量分配方案，以此实现全周期内安全性与经济性的统一。

2 基于全寿命周期的光伏支架结构设计与制造关键技术

2.1 光伏支架结构优化设计技术

结构优化设计的核心在于建立以用钢量最小化为目标函数，以强度、稳定、变形及疲劳寿命为约束条件的数学规划模型。优化变量涵盖立柱间距、檩条截面、斜撑布置角度、节点连接形式等多个方面[4]。在风荷载作用下对支架体系进行动力响应分析时，需要考虑自振频率与风荷载卓越频率的比值，避免出现共振现象。柔性支架体系优化重点在于索系预应力取值与锚固端构造设计，连接节点疲劳寿命评估采用 Miner 线性累积损伤理论。构件所承受的交变应力幅值、循环次数需要满足式（1）所示的疲劳累积损伤条件：

$$D=\sum_i \frac{n_i}{N_i} \le 1.0 \qquad (1)$$

式（1）中：D 为总疲劳损伤累积值，量纲为 1；n_i 为第 i 级应力幅对应的实际循环次数；N_i 为第 i 级应力幅对应的疲劳破坏循环次数，由材料 S-N 曲线确定；i 表示应力幅水平的分级编号。当总损伤值达到 1.0 时，认为构件已经达到了疲劳寿命极限。

2.2 光伏支架材料选型与耐久性设计技术

材料选型要全面考虑力学性能、耐腐蚀性能、加工性能、全周期经济性四类指标。热镀锌钢应用范围最广，屈服强度等级一般选用 Q235B 或者 Q355B，镀锌层厚度依据表 1 所示环境腐蚀等级确定。铝合金支架凭借轻质高强与优异耐腐蚀性能在潮湿环境中具有竞争优势，耐候钢通过添加合金元素形成致密且稳定的锈层来阻止腐蚀介质渗透，构件承载力验算要考虑到腐蚀致使截面有效厚度逐年减薄。轴心受压构件的稳定性承载力满足式（2）要求：

$$N \le \varphi \cdot A_{eff} \cdot f_y \qquad (2)$$

式（2）中：N 为构件轴心压力设计值，单位为 kN；φ 为轴心受压构件稳定系数，按长细比及截面类型由钢结构设计标准查取，量纲为 1；A_{eff} 为构件有效截面面积，考虑腐蚀减薄后按设计基准期末期取值，单位为 mm^2；f_y 为钢材屈服强度设计值，单位为 MPa。该验算确保构件在设计基准期终点时仍具有足够的受压稳定性储备。

2.3 光伏支架制造工艺与质量控制技术

制造工艺质量直接影响构件几何精度、连接可靠性及防腐层附着性能，冷弯成型需控制板材回弹量对成型角度影响，通过模具补偿法将角度偏差控制在 ±1° 以内。冲孔定位精度决定了现场装配效率，孔位偏差累积会导致连接耳板无法对中并且产生强制装配应力，自动熔化极气体保护焊的热输入量控制直接决定了焊缝区域微观组织、残余应力分布，焊接变形控制采用的是对称施焊与分段跳焊相结合的工艺策略[5]。镀前处理过程中的酸洗和助镀工序需要严格把控时间与温度参数，在制造过程中设置下料尺寸复检、冲孔位置抽检、焊缝外观检测、镀层厚度测量四类质量控制停点。

2.4 光伏支架防腐与全寿命维护技术

防腐体系设计寿命要和结构设计基准期相匹配，热镀锌层厚度按照环境腐蚀性等级预留足够的腐蚀裕量。涂层体系适用于高腐蚀环境或镀锌层受损修补场景，常用环氧富锌底漆与聚氨酯面漆组合方案，全寿命维护技术模式包括定期检测、状态评估、维修决策三个层次，定期检测会以目视巡检与仪器抽检相结合，检测的对象有镀层厚度减薄率、螺栓预紧力衰减率、焊缝表面开裂状况、支架整体倾斜度变化。关键节点

焊缝采用磁粉或者渗透检测方法来探查表面开口缺陷，维护决策依据建立在检测数据之上的健康状态档案来进行，对于性能退化超出预期的构件实施提前更换或者补强处理。

3 光伏支架工程应用与全寿命周期评价

3.1 光伏支架工程应用方案与实施流程

云南易门药光互补项目采用柔性支架技术方案，该项目选址在陡坡山地地形，坡度范围处于20°至55°之间，传统的刚性支架因为基础工程量大、地形适应不足而很难实施。柔性支架模式采用预应力索网结构，以钢绞线作为主承载构件，借助端部锚固系统施加初始预应力，施工流程依次为锚固端基础浇筑、端柱与中间立柱安装、钢绞线张拉至设计预应力值、索网节点定位与组件安装。安装时采用分级张拉工艺，在每级张拉后观测索网线形变化来保证预应力均匀性，此方案能够避开陡坡区域密集基础施工，减少土方开挖量和植被破坏面积，施工工期显著缩短。

3.2 光伏支架结构性能与制造质量验证

支架结构性能验证采取现场载荷试验、长期监测相结合的方式，现场载荷试验会用堆载法模拟均匀雪荷载工况，分级施加荷载至设计值的1.5倍，对支架整体变形、节点相对位移进行观测，最大变形量符合规范允许值规定。组件安装之后EL隐裂检测没有发现电池片隐裂缺陷，制造质量验证从镀层厚度检测、焊缝质量抽检这两个方面来执行，镀层厚度使用磁性测厚仪按批量抽取10%构件进行检测，平均值不低于表1对应等级要求值。焊缝目视检测覆盖所有焊缝，主承载构件对接焊缝辅以磁粉探伤抽检，抽检比例为20%，所有抽检焊缝均达到Ⅰ级合格标准。

3.3 光伏支架全寿命周期综合效益评价

全寿命周期综合效益评价从装机增益、材料消耗及长期运维成本三个维度展开，柔性支架方案在相同土地面积下实现装机容量较传统固定支架提升25%，直接增加了发电收益。基础工程量减少了31%，从而降低了前期土建投资、施工周期，柔性支架钢绞线与索锚体相比刚性型钢框架，钢材节约了大约28%。运维方面柔性支架活动部件较少，主要工作集中于锚固端预应力监测与索网线形复测，年度运维工时大概是刚性支架的60%。综合全寿命周期内的初始投资、运维支出、发电收益这三项经济指标，度电成本比传统方案降低了约12%，展现出全寿命周期设计理念的经济效益优势。不同防腐方案在全寿命周期内的性能表现与成本差异见表2。

表2 三种防腐方案的全寿命周期性能与成本对比

对比维度	热浸镀锌	热浸镀锌+增强涂层	耐候钢
防腐性能	中等	优良	良好（依赖稳定锈层）
初期投资	低	较高	居中
施工速度	快	中等	快（免涂装）
焊缝修补便利性	不可直接修补	容易	困难（焊接工艺要求高）
全寿命维护需求	定期检测镀层减薄	涂层复涂+镀层检测	需监测锈层致密性
预期寿命	20年～25年	25年～30年	25年～30年

（注：热浸镀锌为行业应用最成熟的防腐工艺，成本较低但焊缝及破损部位修补困难；热浸镀锌+增强涂层方案防腐性能优良，焊缝及破损点易于修补，但初期投资较高；耐候钢通过添加铜、铬、镍等合金元素形成致密稳定锈层实现“以锈止锈”，省去涂装环节但在焊接难度和外观控制方面存在局限。）

4 结束语

全寿命周期理念贯穿于光伏支架结构设计、材料配置、制造加工、运行维护、综合评价的整个过程之中，有助于实现结构性能、制造质量与运维管理协同优化。结构优化设计能够提高承载能力、材料利用效率，制造工艺控制保障了产品质量稳定性，耐久性设计与维护管理能够延长服役寿命，综合效益评价为技术优化提供了科学依据。全寿命周期技术模式持续完善，将会进一步推动光伏支架制造水平的提高，为光伏电站的安全运行、降低成本并增加效益、产业高质量发展提供更加坚实可靠的技术支撑和实践保障。

参考文献：

[1] 杨洋.基于3D打印快速制造的光伏支架立柱拓扑优化设计方法[J].光源与照明,2023(09):56-58.
[2] 王新居.光伏电站全寿命周期管理优化策略研究[J].光源与照明,2022(12):94-96.
[3] 仲雅娟,赵大乐,赵鹰.光伏电站内不同光伏支架形式数量占比的研究[J].太阳能,2022(09):90-96.
[4] 吴迪,田密,廖心言.四川省某光伏发电项目的光伏支架选型设计[J].太阳能,2022(08):84-91.
[5] 李灵强.复合材料光伏支架梁结构优化分析[J].光源与照明,2021(08):100-102.