

基于层次分析法的光伏发电工程 EPC 模式施工质量风险研究

曹天齐¹ 郭力萍²

1. 内蒙古工业大学土木工程学院 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学电力学院 内蒙古呼和浩特 010051

DOI:10.32629/ems.v8i3.18675

[摘要] 光伏发电产业蓬勃发展的当下，工程建设质量关乎项目全生命周期发电效益与安全稳定性。本文基于层次分析法，结合光伏 EPC 模式全流程特性，从管理、人员、技术、机械、材料、环境六大维度，聚焦组件铺设、并网设计等核心环节，系统识别质量风险，经量化权重排序锁定高优先级风险项，针对性提出精细化整改措施，助力预判支架精度偏差、组件隐裂等光伏特有风险，降低质量事故概率，保障工程建设与运维推进。

[关键词] 光伏发电工程；质量风险识别；层次分析法。

1. 引言

全球能源转型加速推进，光伏发电凭借清洁低碳、可再生优势，成为替代传统化石能源的关键力量，在能源结构中地位凸显。据国家能源局数据，2024 年我国光伏新增装机容量达 2.78 亿千瓦，同比增长 28%，彰显产业强劲发展势头与广阔前景^[1]。

当前光伏工程普遍采用 EPC 总承包模式，总承包商需统筹勘察设计、设备采购、施工安装、调试并网及运维保障等全生命周期环节。相较于传统工程，光伏 EPC 项目需应对组件特性适配、支架精度控制、户外复杂环境发电效率保障等特有挑战，其风险管理呈现范围广、技术关联性强、环境敏感度高、量化评估难等特征。构建贴合光伏场景的风险管理评估体系，研判支架安装偏差、组件热斑效应、并网兼容性等风险管控能力，对保障项目质量安全、提升发电效益至关重要。

针对光伏 EPC 风险管理的复杂性与专业性，本文基于 5M1E 质量管理模型，结合光伏项目风险传导规律，从人、机、料、法、环、管六维切入，以 K 公司 1.92MW 光伏工程为研究对象，构建风险层次结构矩阵，系统识别筛选关键质量风险因素并提出建议，为光伏 EPC 项目建设管理提供科学防控依据与实操参考。

1. 实例研究

1.1 风险分析维度的选取原则

(1) 光伏场景适配性：项目建设质量是 5M1E 模型的直接输出，本次围绕六大维度的探索的是对该模型在光伏项目中的精准适配—完整覆盖“执行者-光伏专用硬件-光伏核心物料-光伏专项技术-全流程管理”全链条，确保风险分析无遗漏、无重叠。

人：作为质量源头，光伏支架立柱垂直度校准、横梁水平度调节、组件串并联安装等精细化工序的操作精度，直接

取决于人员的光伏专业技能与合规意识；

机：作为硬件基础，光伏组件转换效率、逆变器 MPPT 跟踪精度、支架系统抗风载 / 雪载性能等专用设备参数，直接决定项目发电效率与 25 年设计使用寿命；

料：作为物质前提，光伏组件 EL 检测合格率、支架型材壁厚与防腐涂层等级、直流电缆耐候性等核心材料质量参数，是工序合格的前置保障；

法：作为技术核心，需结合光伏项目地理纬度（影响阵列倾角设计）、日照时长（影响组件排布密度）、极端天气频率（影响支架强度设计）等优化工艺方案，决定施工可行性与质量达标率；

环：作为外部影响因素，极端温湿度、风沙、暴雪等自然环境直接影响支架安装精度与组件稳定性，而政策合规性、并网接入条件则决定项目合法性与经济性；

管：作为管控关键，通过精细化管理协调各要素，重点化解光伏支架基础沉降、组件遮挡、接线虚接等特有风险，确保质量落地。

(2) 光伏风险传导特性：光伏项目全流程中，质量风险具有显著的光伏特异性传导规律，六大维度划分契合该逻辑：

前端：支架基础设计偏差、组件选型不当等技术/材料风险，传导至施工环节引发支架安装精度不足、阵列倾角不一致；

中端：人员光伏专业技能不足、管理流程缺失等风险，造成组件隐裂、接线端子处理不规范等工序缺陷，影响并网稳定性；

后端：逆变器故障、支架防腐失效等设备/材料风险，导致发电效率衰减、运维成本上升，直接影响项目收益。

1.2 风险因素识别

本研究邀请公司安质、光伏设计、采购供应链、光伏系统工程、运维管理、工程造价、工程法务等专业共 10 人组

成专家团队，结合 K 公司 1.92MW 光伏发电工程实际问题，依据《GB/T 50796-202x 光伏发电工程验收规范》《工商业分布式光伏电站技术标准》《光伏电站施工规范》等行业标准

与内部文件，从六大一级指标中提炼光伏工程高频二级风险指标，每条一级指标筛选决定性较强的前 5 项，具体如下：

表 2.1 风险因素识别清单初筛

目标层	一级指标	二级指标	风险后果
光伏发电工程 质量风险	人员因素 A ₁	光伏专业技能水平 A ₁₁	支架安装精度不足、组件铺设错位，引发阵列扭曲
		质量管控意识与责任心 A ₁₂	忽视组件隐裂检测、支架螺栓紧固不到位，埋下安全隐患
		光伏技术交底有效性 A ₁₃	阵列倾角、间距设计要求传达失真，导致施工偏差
		支架/组件安装实操经验 A ₁₄	操作不当引发支架应力集中、组件边框损坏
		并网调试专业能力 A ₁₅	接线逻辑错误，影响并网稳定性
	技术因素 A ₂	光伏阵列和接入方式设计科学性 A ₂₁	倾角、间距不合理，引发组件遮挡、发电效率下降
		设备基础施工工艺可靠性 A ₂₂	基础沉降不均，导致钢构变形、设备损坏
		光伏技术交底执行效果 A ₂₃	施工与设计脱节，出现组件排布混乱
		设备选型适配性 A ₂₄	组件与逆变器匹配度低，发电效率损耗增加
		图纸深化完善度 A ₂₅	支架连接节点细节缺失，引发安装偏差
	环境因素 A ₃	极端天气风险 A ₃₁	暴雪 / 强风导致支架坍塌、组件破损
		温湿度 A ₃₂	高温高湿导致支架防腐失效、组件密封性能下降
		并网政策与接入条件 A ₃₃	并网参数不匹配，项目无法合规运行
		日照资源适配性 A ₃₄	阵列朝向设计与日照角度不符，发电量衰减
		外线距离与电力负荷 A ₃₅	外线投资占比过大影响并网经济性
	管控因素 A ₄	光伏通病防治落实 A ₄₁	阵列倾角不一、支架螺栓松动等问题反复发生
		监理履职水平 A ₄₂	未识别支架垂直度偏差、电缆接线不规范等关键缺陷
		质量管理体系执行力 A ₄₃	巡检流于形式，支架安装精度、组件间隙等未达标
		光伏专项检测合规性 A ₄₄	EL 检测、接地电阻测试等未按标准执行
		检验批自检专检规范性 A ₄₅	支架安装、组件铺设未验收即进入下一道工序
	材料因素 A ₅	光伏组件质量合格性 A ₅₁	组件隐裂、转换效率不达标，影响发电效益
		支架系统材料质量 A ₅₂	型材壁厚不足、防腐涂层破损，导致支架锈蚀变形
		光伏材料供应稳定性 A ₅₃	组件支架型号不符、辅材供货延迟，引发施工质量隐患
		供应商选择 A ₅₄	材料不符合光伏户外使用标准，缩短使用寿命
		认证质保 A ₅₅	质保条款缺失，后期组件支架故障无法追责
机械设备因素 A ₆	安全防护可靠性 A ₆₁	吊装、焊接设备防护不足，导致组件破损	
	逆变器故障应急处置 A ₆₂	逆变器调试设备故障，延误并网进度	
	设备操作 A ₆₃	激光测距仪、全站仪操作不当，导致安装精度偏差	
	组件安装设备适配性 A ₆₄	压块安装工具选型错误，引发组件边框变形	
	设备并网调试检验 A ₆₅	并网测试仪校准不当，导致检测数据失真	

1.3 风险评估

是将每个指标的重要程度实现量化。在建立重要性矩阵时，重要程度量化要参考表 2.2。

1.3.1 建立风险评价集

在层次分析法的实施中，首先要构建判断矩阵，其目的

表 2.2 两两因素对比量化

a _{ij}	定义	a _{ij}	定义
1	因素a _i 与因素a _j 同等重要	9	因素a _i 与因素a _j 极端重要
3	因素a _i 与因素a _j 稍微重要	2, 4, 6, 8	相邻判断的中间值
5	因素a _i 与因素a _j 明显重要	倒数	若a _i 与a _j 的比较结果为a _{ij} ，则a _j 与a _i 的比较结果为a _{ij} 的倒数
7	因素a _i 与因素a _j 强烈重要		

1.3.2 权重确定和指标计算

对一级指标各因素间两两对比，构建判断矩阵。计算完

成后校验结果是否正确，可以通过计算矩阵的最大特征根 λ_{max} 来判定^[2-3]。

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum \frac{(KW)_i}{W_i} \quad (1)$$

其中 K 为判断矩阵， W_i 为指标层中元素的权重向量^[2-4]。

然后进行一致性检验和随机一致性指数^[2-4]。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

当满足 $CR < 0.1$ 时，一致性检验通过，计算结果正确。

根据公式 (1) ~ (3) 计算得到一级指标的两两对比权重结果。

仿照这个计算过程，可以计算得到二级指标各因素两两对比结果，将两层指标权重相乘，可以得到二级指标的综合指标权重，整理得到表 2.4 中汇总后的结果。

表 2.3 一级指标各因素重要性比较矩阵及权重确定 (1~10 分) (列相对于行)

指标	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	权重 W	一致性校验
A ₁	1	3	7	1/3	5	5	0.2460	$\lambda_{max} \approx 6.147$ CI=0.0294 RI=1.24 CR≈0.0237 < 0.1
A ₂	1/3	1	5	1/5	3	3	0.1294	
A ₃	1/7	1/5	1	1/9	1/5	1/3	0.0283	
A ₄	3	5	9	1	7	7	0.4543	
A ₅	1/5	1/3	5	1/7	1	3	0.0885	
A ₆	1/5	1/3	3	1/7	1/3	1	0.0534	

表 2.4 风险指标权重总排序

一级指标	权重	二级指标	权重	总权重	总排序	一级指标	权重	二级指标	权重	总权重	总排序
A ₁	0.2460	A ₁₁	0.1344	0.0331	9	A ₄	0.4543	A ₄₁	0.2421	0.1100	3
		A ₁₂	0.5028	0.1237	2			A ₄₂	0.1852	0.0841	4
		A ₁₃	0.2602	0.064	6			A ₄₃	0.4510	0.2049	1
		A ₁₄	0.0348	0.0086	20			A ₄₄	0.0787	0.0358	8
		A ₁₅	0.0678	0.0167	14			A ₄₅	0.0400	0.0182	13
A ₂	0.1294	A ₂₁	0.4547	0.0588	5	A ₅	0.0885	A ₅₁	0.0348	0.0031	27
		A ₂₂	0.2407	0.0311	10			A ₅₂	0.1344	0.0119	19
		A ₂₃	0.1203	0.0156	15			A ₅₃	0.0678	0.0060	23
		A ₂₄	0.0640	0.0083	21			A ₅₄	0.5028	0.0445	7
		A ₂₅	0.1203	0.0156	15			A ₅₅	0.2602	0.0230	12
A ₃	0.0283	A ₃₁	0.2602	0.0074	22	A ₆	0.0534	A ₆₁	0.5312	0.0284	11
		A ₃₂	0.1344	0.0038	26			A ₆₂	0.2328	0.0124	18
		A ₃₃	0.5028	0.0142	17			A ₆₃	0.1002	0.0054	24
		A ₃₄	0.0678	0.0019	29			A ₆₄	0.0420	0.0022	28
		A ₃₅	0.0348	0.001	30			A ₆₅	0.1002	0.0054	24

1.3.3 结果分析

基于层次分析模型，光伏 EPC 工程施工质量风险呈现显著的专业特异性：

(1) 一级指标权重排序为：管控因素 (0.4543) > 人员因素 (0.2460) > 技术因素 (0.1294) > 材料因素 (0.0885) > 机械设备因素 (0.0534) > 环境因素 (0.0283)，其中管控因素占比超 45%，是光伏工程质量风险的核心管控维度；

(2) 综合权重排名前三的高风险项均聚焦光伏核心环节：

1) 质量管理制度执行力 A43 (0.2049)：占比最高，核心问题是光伏专项制度流于纸面，支架安装精度巡检、组件 EL 检测等关键环节未落实；

2) 质量管控意识与责任心 A12 (0.1237)：一线人员忽视光伏组件易碎、支架精度敏感等特性，存在侥幸心理；

3) 光伏通病防治落实 A41 (0.1100): 阵列倾角不一、支架螺栓松动、组件遮挡等光伏常见问题反复发生, 追责不到位。

1.3.4 应对措施

(1) 强化质量管理体系执行力:

针对光伏专项制度流于纸面、关键工序巡检形式化、验收标准宽松等痛点, 构建三级巡检机制: ①班组自检, 每日开工前 100% 校准激光测距仪等施工工具, 核查支架型材、组件外观及作业面平整度, 填写确认单, 记录支架倾角、组件间隙等核心数据; ②监理巡检, 每日检测支架间距允许偏差 $\pm 2\text{mm}$ 、压块螺栓紧固扭矩 $\geq 8\text{N}\cdot\text{m}$ 、组件间隙允许偏差 $\pm 1\text{mm}$ 等指标, 通过水印相机+GPS 定位留存影像, 同步记录组件 EL 检测数据; ③总包周检, 由项目经理带队全覆盖巡查在建区域, 重点核验阵列倾角一致性允许偏差 $\pm 0.5^\circ$ 、支架基础沉降情况, 出具质量巡检报告并明确整改要求。同时, 实施关键工序“双签字”验收制度, 支架基础浇筑、并网调试等核心工序需经施工班组与专业监理工程师共同签字确认, 且每道工序留存不少于 3 张含检测工具读数的影像资料, 上传至项目管理平台归档追溯。

(2) 提升质量管控意识与责任心:

针对一线人员对光伏设备特性认知不足、管理人员重进度轻质量、岗前培训缺位等问题, 采取三项措施: ①开展质量红线宣誓与岗前专项考核, 组织新进场人员(含劳务班组)学习光伏组件防护、支架精度控制等专项内容, 签订《光伏工程质量责任承诺书》, 通过闭卷考试与实操考核后方可上岗; ②建立“光伏质量明星”正向激励机制, 每月评选质量明星班组及个人, 给予 200-500 元现金奖励并公示, 奖励与工序零缺陷率、组件隐裂零发生率等硬指标挂钩; ③组织每周质量事故案例复盘会, 选取行业及项目典型事故, 拆解风险成因、划分责任主体、制定改进措施, 要求班组长与专业监理参会, 形成《复盘纪要》并跟踪落实。

(3) 落实光伏质量通病防治。

针对阵列倾角不一、支架螺栓松动等通病反复出现、责任追溯难等痛点, 实施三项举措: ①建立通病溯源台账, 精准记录通病发生位置、技术成因、责任班组、整改措施及复查结果, 每季度统计发生频次, 对重复违规班组约谈并优化施工方案; ②构建“终身追责+经济挂钩”机制, 在合同中明确关键设备 2 年质量责任追溯期, 预留 3% 合同额作为质量保证金, 质保期内通病复发 ≥ 3 次则扣除保证金, 重大质量事故追加 1%-5% 合同额罚款, 并将责任单位纳入黑名单;

③推行样板先行制度, 各施工区域开工前打造 3-6 个光伏阵列的质量样板段, 明确组件间隙误差 $\leq \pm 1\text{mm}$ 、支架垂直度偏差 $\leq 1\%$ 等量化标准, 经业主、监理、总包三方验收合格后, 方可开展大面积施工。

2. 结论

风险管理是光伏 EPC 项目管理核心, 其效能直接决定项目全生命周期质量、发电效益与安全稳定性。EPC 模式为光伏项目带来资源优化配置机遇, 但受项目规模扩大、应用场景多元化、产业链延伸等因素影响, 光伏特有风险隐患与管理挑战日趋复杂, 优化专业风险管控策略至关重要。

本研究结合层次分析法与工程实践, 识别筛选 EPC 模式下光伏特有风险因素, 构建专属风险判断矩阵, 实现风险量化评估与等级判定。案例验证表明模型适配性与实操性较强, 可梳理风险传导路径、明确关键控制点, 为制定差异化应对策略、提升风险管理精细化水平提供支撑, 对保障项目效益、降低运维成本意义重大。

[参考文献]

[1] 张英英, 吴可仲. “反内卷”下的中国光伏: 2026 年或现盈利拐点[N]. 中国经营报, 2025-12-22 (B16).

[2] 鲁枝海, 鲁枝升, 王喆, 段家贵. 基于模糊层次分析模型的 EPC 工程总承包商风险管理评估[J]. 项目管理技术. 2023, 21 (04): 88-93.

[3] 付海婧, 胡海青, 李锦, 薛萌. 基于 FAHP 的烟草企业风险评估研究-以 XA 市烟草公司为例 [J]. 西安理工大学学报. 网络首发 2025-04-16.

[4] 章哲玮. 分布式光伏发电建设项目全过程风险管理分析[J]. 中华建设, 2024 (07): 71-73.

[5] 熊亚军. 集中式山地光伏项目施工中 EPC 总承包方的风险管理策略[J]. 居业. 2025 (03): 217-219.

[6] Manoharan H, Sahoo N S .A Study on Dam Site Suitability Using AHP, Fuzzy Overlay and Machine Learning Techniques[J]. Water Resources Management, 2026, 40 (2): 63-63.

[7] Ilhan E, Samadi F, Karimi H .Solar farm suitability mapping for the Contiguous United States using the fuzzy analytic hierarchy process and geospatial analysis[J]. Renewable Energy, 2026, 260125229-125229.

作者简介: 曹天齐, 1991 年 12 月, 男, 汉族, 本科, 河北承德, 高级工程师, 电气、新能源光伏。