

# 光伏电站户外组件高效运维优化举措

刘金伟

中电建新能源集团股份有限公司新疆分公司 新疆维吾尔自治区 838100

**【摘要】**：针对百 MW 级地面光伏电站户外组件巡检效率低、故障响应滞后以及清洁决策粗放等问题，本文围绕智能巡检、精准清洁和故障预警三个方面提出运维优化策略。通过部署无人机可见光与红外热成像巡检系统，引入 AI 视觉识别模型，实现组件缺陷定位、风险分级和工单流转；通过积灰监测、发电偏差分析和无水清洁技术，推动清洁作业由固定周期转向状态触发；通过电压、电流和背板温度构建故障预警模型，提升异常识别前置能力。结果表明，优化后单组件平均巡检时间由 5 min 缩短至 1 min，平均故障响应时间由 24 h 缩短至 2 h，故障识别率由 70% 提高至 95%，年发电量可提升约 6%，年运维成本可节省约 20 万元，投资回收期约为 1.5 年。研究表明，基于数据感知和智能判别的运维模式能够显著提升户外组件运行可靠性与经济效益。

**【关键词】**：光伏电站；户外组件；智能巡检；故障预警；精准清洁

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.051

## 引言

在“双碳”目标持续推进和新能源装机规模快速扩大的背景下，光伏电站已成为电力系统绿色转型的重要支撑。随着百 MW 级地面光伏电站大量投运，户外组件数量庞大、分布范围广、运行环境复杂等特点逐渐放大了运维管理压力。组件长期暴露于强辐照、风沙、雨雪和温差变化环境中，容易出现积灰遮挡、热斑、隐裂、接线盒异常、线缆松脱以及组串失配等问题，这些问题若不能及时识别和处置，将直接影响组件发电效率和电站收益。传统运维模式主要依赖人工巡检、固定周期清洁和告警后检修，存在巡检周期长、记录标准不统一、故障发现滞后以及资源配置粗放等不足，难以满足大型光伏电站精细化管理需求。因此，探索面向户外组件的高效运维优化路径具有现实必要性。本文结合智能巡检、积灰监测、无水清洁和故障预警模型，分析光伏组件运维从人工经验驱动向数据状态驱动转变的可行方式，以期提升电站运行可靠性、降低运维成本和增加发电收益提供参考。

## 1 光伏电站户外组件运维现状及问题分析

光伏电站户外组件长期暴露在强辐照、风沙、雨雪以及昼夜温差变化环境中，组件表面状态、接线端子接触质量以及组串电气输出容易受到外部条件影响。现阶段，百 MW 级地面光伏电站仍较多依靠人工巡检开展组件外观检查、热斑排查以及异常组串定位工作，运维人员需要沿组件阵列逐排查看边框、玻璃、接线盒以及线缆状态，单组件平均巡检耗时约 5 分钟。在组件数量达到数十万块的运行场景下，这种方式会把大量人力消耗在重复性观察以及记录工作中，巡检周期被拉长，隐性缺陷也容易在低频检查中被延后发现。

进一步观察传统运维流程可以发现，故障识别滞后是制约户外组件稳定运行的突出问题。逆变器告警、人工复核以及现场处置之间存在较长信息传递链条，故障响应时间平均超过 24 小时，热斑、隐裂、旁路二极管异常以及组串失配等问题难以

及时形成闭环处置。与此同时，组件清洁工作通常按照固定周期开展，未能充分结合降尘量、降雨频次、组件倾角以及发电损失变化进行动态判断。积灰未及时清理时，组件透光率下降会直接削弱有效辐照接收能力，年发电量下降约 3%。鉴于人工巡检低效、故障处置滞后以及清洁决策粗放等现实约束，户外组件运维亟需向状态感知、数据判别以及差异化作业方向优化。

## 2 光伏电站户外组件高效运维优化策略

### 2.1 智能巡检系统的部署与应用

鉴于百 MW 级地面光伏电站组件分布范围广、阵列排布规则但现场环境扰动频繁的运维现实，智能巡检系统宜把无人机自主飞行平台以及 AI 视觉识别模型当作核心技术单元来使用，形成覆盖航线规划、图像采集、缺陷识别以及工单流转的闭环作业链条。前端无人机搭载可见光相机以及红外热成像设备，依靠 RTK 定位、航点任务管理以及地形跟随控制开展阵列级巡检，飞行路径按照组件排布方向、组串编号以及逆变器分区进行匹配，避免人工巡检中因路线重复、漏检以及记录口径不一致造成的信息偏差。

在图像数据进入边缘计算终端或云端分析平台后，预训练 AI 视觉模型可对组件热斑、隐裂、边框腐蚀、玻璃破损、接线盒异常以及线缆脱落等缺陷进行特征提取。预训练模型指在大量标注图像样本上完成基础学习后，再结合电站现场图像进行适配训练的识别模型，其优势在于能够把温度异常、纹理断裂以及边缘形变等视觉信号转化为可判别的缺陷类别。结合户外组件运维需求，系统还需把缺陷位置与组串台账、逆变器告警以及历史巡检记录进行关联，生成包含组件编号、缺陷类型、风险等级以及处置建议的巡检结果。由此，巡检工作从依赖人工逐块观察转向由机器完成高频覆盖以及初筛判别，巡检效率可按提高 80% 以上进行部署目标设定，故障识别准确率可按 95% 以上进行模型验收约束，为后续差异化检修以及运维资源

调度提供数据基础。

## 2.2 组件清洁策略的精准优化

组件清洁策略不宜继续沿用固定周期模式，而应把积灰状态、气象扰动以及组串发电偏差纳入同一判断框架。积灰厚度传感器可布设在代表性组件边缘以及阵列迎风侧位置，用于连续采集玻璃表面颗粒沉积厚度以及遮挡变化信息，并且把该数据同辐照强度、组件温度、逆变器直流侧功率以及历史清洁记录进行关联。鉴于百 MW 级地面光伏电站不同方阵受风向、地表裸露程度以及组件倾角影响差异明显，清洁决策需从全站统一安排转向逆变器分区以及组串层级的状态判别，避免低积灰区域被过度清洁，也减少高积灰区域长期等待统一作业所造成的发电损失。

在动态触发机制设计中，可把积灰厚度变化同单位辐照发电量下降幅度进行相关性分析，形成面向运维调度的清洁阈值。当积灰造成的发电量下降达到 5% 时，系统向运维平台推送清洁任务，并把组件编号、方阵位置、积灰等级以及预计损失量写入工单信息。该机制把清洁行为从经验判断转化为数据驱动下的条件触发，使作业时间更贴近组件实际受污程度。结合水资源约束以及地面电站分布广的运维现实，清洁装备宜选用无水清洁技术，把滚刷、负压吸附以及柔性接触控制当作主要作业单元来使用，减少清水运输、废水回收以及人工冲洗环节。对于沙尘沉积较多且降雨补偿不足的阵列，无水清洁还可降低玻璃表面残留水痕带来的二次附着风险。由此，组件清洁成本可按降低约 15% 作为优化目标设定，清洁资源也能够更多投向发电损失敏感区域。

## 2.3 故障预警模型的构建与实施

围绕户外组件异常发现滞后的运维约束，故障预警模型宜把组串直流电压、工作电流以及组件背板温度当作核心输入量来使用，并且结合逆变器采样数据、汇流箱运行记录以及环境监测数据开展状态判别。电压变化能够反映组件串联回路开路、接触不良以及旁路二极管导通等异常倾向，电流波动则更容易揭示遮挡、积灰加重以及组串失配造成的输出偏离，温度数据可用于识别热斑扩展、接线盒发热以及局部散热条件恶化。鉴于户外组件运行状态同时受辐照强度以及环境温度影响，模型构建过程中需对实时采样值进行归一化处理，把不同量纲数据转化为可比较的状态特征，减少天气扰动对异常判断的干扰。

组件故障预警阈值可按公式 1 进行计算。

$$Y = \alpha \times U + \beta \times I + \gamma \times T$$

其中，Y 表示组件故障预警得分，U 表示归一化后的电压状态值，I 表示归一化后的电流状态值，T 表示归一化后的温度状态值， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别表示电压、电流以及温度指标在预警判别中的权重系数。

在模型实施阶段，权重系数不宜选用固定经验值长期沿用，而应结合电站历史故障样本、同一区域健康组串运行基线以及不同季节辐照条件进行动态修正。运维平台可把 Y 值同预设风险区间进行比对，当预警得分连续偏离健康阈值并且同逆变器侧功率衰减趋势相互印证时，系统将异常组件编号、所属组串、风险类型以及建议处置时限写入预警工单。为减少偶发云影、瞬时风冷以及通讯抖动引起的误报，模型还需设置滑动时间窗以及多点一致性校验，把单次异常采样转化为连续状态变化判断。由此，组件故障识别能够从告警后处置向趋势性预判延伸，为热斑、接触不良以及组串失配等问题提供提前 24 小时预警支撑。

## 3 光伏电站户外组件运维优化效果评估

### 3.1 运维效率提升效果分析

鉴于百 MW 级地面光伏电站组件数量大、阵列跨度长以及人工记录口径差异明显的运维场景，效率评估需把单组件巡检耗时、故障响应时间以及故障识别率作为核心指标来开展对比分析。优化前，运维人员依靠现场步行查看以及手工登记完成组件外观核查，单组件平均巡检时间约为 5 min，异常信息还需经过逆变器告警确认、现场复核以及工单派发等环节流转，平均故障响应时间约为 24 h，故障识别率维持在 70% 左右。智能巡检系统投入后，无人机航线把组件排布方向、组串编号以及逆变器分区纳入同一巡检任务，AI 视觉识别模型能够把热斑、玻璃破损、线缆脱落以及接线盒异常转化为结构化缺陷记录，单组件平均巡检时间可压缩至 1 min。与此同时，预警模型把直流电压、工作电流以及背板温度的连续变化纳入风险判别，使异常组件从被动等待告警转向趋势性筛查，故障响应时间可缩短至 2 h，故障识别率提高至 95%。表 1 列示的指标变化表明，运维优化并非单纯减少人工巡检工作量，而是把数据采集、缺陷判别以及工单流转压缩到同一闭环链条中，巡检效率、响应速度以及异常识别稳定性均获得较明显改善。

### 3.2 发电量增益及经济效益评估

从发电收益角度来看，户外组件运维优化的价值主要体现在有效辐照接收能力恢复、异常组串损失压降以及检修停机时间缩短等方面。百 MW 级地面光伏电站在长期运行中，积灰遮挡、热斑扩展、接线端子接触不良以及组串失配会持续削弱直流侧输出能力，若仍沿用固定周期清洁以及告警后处置模式，发电损失往往在日尺度运行波动中被稀释，不易被及时识别。运维优化后，积灰状态监测把清洁任务推送到发电损失较高的逆变器分区，智能巡检系统把组件缺陷定位到具体编号，故障预警模型还把电压、电流以及背板温度的连续偏离转化为风险工单，三类措施共同压缩了组件低效运行时长。结合前文积灰造成约 3% 年发电量下降以及故障响应时间由 24 h 缩短至 2 h 的指标变化，优化后年发电量可按提升 6% 进行效益测算，该

增益既包括清洁策略调整带来的透光率恢复，也包括热斑、隐裂以及接触异常提前处置所减少的组串输出损耗。

经济效益评估需把新增发电收益、运维成本节约以及系统投入回收周期纳入同一口径。智能巡检替代人工逐排巡检后，现场人员投入、纸质记录整理以及复核沟通成本明显下降；无水清洁技术减少清水运输以及人工冲洗环节，使清洁作业费用进一步收敛；预警工单减少故障扩大后形成的组件更换以及停机检修支出。按照百 MW 级地面光伏电站年度运维台账测算，优化后年节省运维成本约 20 万元。若把无人机巡检设备、AI 识别平台、积灰监测终端以及预警模型接入费用作为初始投入，并结合年发电量提升 6%带来的电费增收进行折算，投资回收期约为 1.5 年。由此可见，该优化方案并非单纯增加数字

化设备配置，而是把运维资源投向发电损失更敏感的组件和组串环节，经济可行性较为明确。

#### 4 结语

光伏电站户外组件运维优化的关键，不仅在于引入单一智能设备或自动化工具，更在于建立覆盖状态感知、缺陷识别、风险判断和作业闭环的系统化管理机制。通过无人机巡检与 AI 视觉识别结合，组件外观缺陷和热异常能够被快速定位并转化为结构化数据，为后续检修提供清晰依据；通过积灰监测与发电损失分析结合，清洁作业可以根据实际污染程度和收益影响进行动态安排，减少无效作业和延迟清洁造成的损失；通过电压、电流和温度等运行数据构建预警模型，运维人员能够在故障扩大前开展针对性处置，降低停机检修和组件更换风险。

#### 参考文献：

- [1] 陈昭可,李亭.光伏电站优化运维技术分析[J].大众标准化,2024,(24):36-38.
- [2] 高翔.基于物联网技术的分布式光伏电站智能运维系统[J].内蒙古科技与经济,2025,(12):157-160.
- [3] 余海清,赵宇鹏.高效光伏电池板阵列优化配置研究[J].光源与照明,2024,(12):141-143.
- [4] 韦笑,蔡沛沛,吴驰.影响光伏组件 I-V 输出特性的典型因素分析及保护措施[J].新能源科技,2024,5(06):48-53+60.