

基于 AI 视频识别的光伏电站施工安全智能监控研究

张 能 李松庭 黄鹏飞

大唐南京热电有限责任公司 江苏 南京 210000

【摘 要】：光伏电站施工现场存在阵列铺设、吊装、临时用电和高处作业交叉风险，人工巡查难以连续覆盖人员行为、危险区域变化和误报警处置。本文识别光伏施工现场多目标视频识别难点、光伏阵列吊装施工安全防护措施和 AI 视频识别现场安全监控措施，构建 AI 视频识别智能监控系统，并完成光伏阵列施工阶段安全风险评估、视频识别数据与风险阈值对比分析和施工多源安全监控数据融合分析。监控结果应回到具体区域、具体人员和具体处置，不以单帧识别值替代安全判断。

【关键词】：AI 视频识别；光伏电站；施工安全；智能监控；电子围栏

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.067

引言

光伏电站建设具有场区面积大、作业点分散、吊装与电气施工交叉等特点，传统人工巡查难以连续覆盖全部风险点。AI 视频识别能够把人员、车辆、吊装半径、临电区域和高处作业状态转化为可计算的安全事件，但现场反光、遮挡和网络延迟会影响识别稳定性。施工安全智能监控应把算法识别、电子围栏、风险阈值和处置流程连接起来，形成面向现场动作的安全管理系统。

1 光伏电站施工安全智能监控概况

1.1 光伏施工现场多目标视频识别难点

光伏施工画面中，支架、组件边框、脚手架、臂架和堆料形成大量平行线，高反光组件会削弱人员轮廓。人员在支架间穿行时，安全帽、背心和安全绳常被檩条或车辆遮挡，单帧检测容易把半身人员并入背景。早晚低角度光照和阴影会改变目标边界，摄像头应避开正逆光主方向，使阵列行距、视场重叠和人员像素尺寸同时满足识别要求^[1]。施工动作相似性也会放大误差。组件搬运、支架校正、线缆敷设和吊装指挥都包含弯腰、抬臂、短暂停留等动作，若只按姿态输出异常标签，正常安装动作可能被误报为摔倒或闯入。运输车辆与作业人员在同一路径交错时，系统应同时读取人员位置、车辆方向和危险边界，不能把单个目标框直接等同于安全事件。

1.2 光伏阵列吊装施工安全防护措施

光伏阵列吊装和组件铺设的安全防护先由物理边界确定。吊车支腿展开区、构件堆放区、组件转运通道和临边作业点应设置可见围挡，视频识别再以这些边界作为电子围栏基准。吊物禁入区应随臂架回转角度和落点移动，人员进入缓冲带时触发提示，越过禁入边界后触发现场核查^[2]。防护措施还要与施工组织节奏匹配。组件开箱、支架紧固、电缆敷设和汇流箱接线常由多个班组交叉推进，单一规则会把临时交叉作业全部判为异常。作业票、班组排班和危险作业申请应同步到监控平台，使人员滞留、PPE 缺失和车辆接近事件能够同当班任务匹配。

1.3 AI 视频识别现场安全监控措施

AI 视频识别现场监控由前端采集、边缘推理、平台复核和处置反馈组成。摄像头覆盖阵列主通道、吊装点、材料堆场、箱变接线区和临时用电点，边缘 AI 盒初筛人员、车辆和 PPE 状态，平台再按时间、区域和作业类型合并事件。监控措施的有效性取决于告警链条。未戴安全帽、反光背心缺失、人员进入吊装区、车辆逆行和高处未系挂应分级处理：一般提醒进入班组端，危险区域越界进入声光报警，持续滞留或重复违章进入安全员核查。平台保存短视频片段、识别框、处置人和关闭时间，便于复盘误报和整改效果。图 1 展示监控布点与数据传输关系。



图 1 光伏电站施工 AI 视频识别监控布点

图 1 中，视频采集点围绕光伏阵列、吊装区和通道布置，画面先进入边缘 AI 盒，再由监控平台汇总并向移动端推送报警，适合解释前端采集和平台处置之间的连接。

2 AI 视频识别智能监控系统建立

2.1 施工现场多视角视频采集监测子系统

多视角视频采集子系统围绕阵列行间通道和危险作业点布设。固定枪机覆盖主通道和材料堆场，球机跟踪吊装回转区和车辆转弯点，移动摄像头在支架成片安装阶段补足临时盲区^[3]。摄像头过低容易被组件和人员遮挡，过高会压缩安全帽、背心和安全绳细节，高位全景与低位细节画面组合可同时保留区域位置和目标细节。边缘 AI 盒对不同视频流进行时间同步，帧率不足时，快速穿越电子围栏的人员可能只保留少量关键

帧，平台难以判断进入方向；夜间、阴雨和扬尘条件下，补光、镜头清洁和码率自适应属于识别质量控制。

2.2 作业人员行为识别监测子系统

作业人员行为识别以人员目标框、骨架关键点和 PPE 识别结果为输入，输出未戴安全帽、未穿反光背心、攀爬支架、奔跑穿行、滞留和倒地等事件。模型训练覆盖反光、半身遮挡和多人交叉后，连续 8 帧以上达到阈值才进入告警；吊装区闯入阈值取 0.60 且 1min 内处置，缓冲区滞留阈值取 0.66 且 2min 内复核，两类事件分别对应强制核查和普通提醒^[4]。安全帽和背心属于外观目标，攀爬、倒地和越界属于时序事件，平台要把轨迹、速度和停留时间共同纳入判断。表 1 列出主要识别事件与处置口径。

表 1 光伏施工 AI 视频识别风险事件矩阵

风险事件	识别对象	建议阈值	处置时限	关联区域	复核重点
未戴安全帽	头部与安全帽	0.70	5	阵列通道	遮挡与逆光
吊装区闯入	人员脚点与吊物区	0.60	1	吊装回转区	边界映射
高处未系挂	人员姿态与安全带	0.65	2	屋面或支架顶部	系挂点可见度
车辆人机接近	车辆前缘与人员	0.68	3	运输通道	倒车方向
临电区滞留	人员停留轨迹	0.72	5	箱变接线区	作业许可
缓冲区滞留	人员轨迹与区域	0.66	2	吊装缓冲区	停留时间

表 1 中，吊装区闯入和高处未系挂的建议阈值低于普通临电区滞留，处置时限也更短；未戴安全帽和车辆人机接近应对遮挡、逆光和倒车方向。

2.3 危险区域电子围栏联动监测子系统

危险区域电子围栏把禁入区、缓冲区和作业许可边界转化为视频坐标。光伏场区常见围栏包括吊装回转半径、临边高处作业区、箱变接线区、临时电缆跨越区和车辆倒车盲区^[5]。系统先用相机标定矩阵把像素点映射到现场平面，再将人员脚点、车辆前缘和吊物投影点同围栏多边形比较；支架安装阶段风险集中在桩位、檩条和吊装点，组件铺设阶段转向搬运通道、阵列边缘和堆放区，电气接线阶段则突出带电测试、沟槽和箱变门前操作空间。像素到现场平面的映射关系见式（1）。

$$d = \sqrt{(q_x)^2 + (Y(u, v) - q_y)^2} \quad (1)$$

式（1）中， d 为目标到电子围栏边界点的距离，单位为 m ； q_x 和 q_y 为围栏边界点坐标，单位为 m ； X 和 Y 为由像素坐标换算的现场坐标函数，单位为 m ； u 和 v 为图像像素坐标，单位为 $pixel$ 。目标脚点映射到现场平面后， d 小于缓冲距离时进入提示区， d 小于 0 时判为越界。

电子围栏距离公式给出像素坐标转为现场边界距离的计算入口，还要把危险作业区、缓冲区和处置链路放到同一图面中判读。人员脚点越过红色边界后，声光报警和停工核查才能形成现场动作；若只保留距离值，安全员无法判断越界来自吊装区、通道还是临电边界，也无法安排对应班组复核。电子围栏联动关系见图 2。

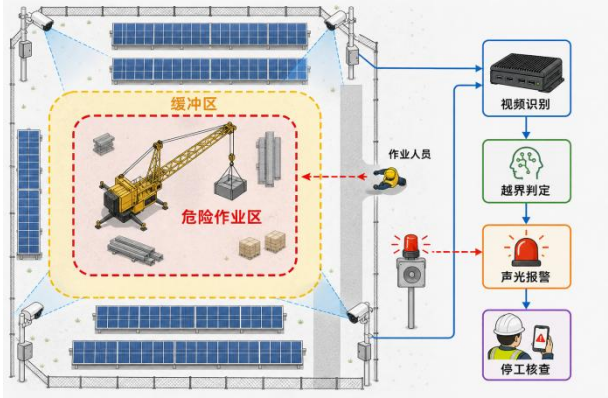


图 2 危险区域电子围栏联动监测

图 2 中，危险作业区和缓冲区以不同颜色区分，人员接近红色边界后进入视频识别和越界判定链路，声光报警与停工核查把画面事件转化为现场处置。

2.4 高处作业违章风险实时识别子系统

高处作业违章识别重点不在于单纯发现人员处于高位，而在于确认作业面、系挂点、身体姿态和临边关系。光伏支架顶部、屋面边缘和组件搬运通道常出现半蹲、跨越、俯身接线等姿态，模型应把人体骨架与安全带、生命绳和临边防护同时关联。人员只要短时离开安全通道并靠近阵列边缘，平台就应标记为待复核事件；若同时缺少系挂点或监护人，则提升到强制核查。该子系统还要识别脚手板缺失、移动梯倾角异常和吊装半径内高处交叉作业，把违章位置推送给班组长和安全员，避免画面报警停留在屏幕层面。

2.5 施工安全监控数据平台集成构建

施工安全监控数据平台把视频事件、人员定位、设备状态、风速数据和作业票放到同一时间轴。每条记录应包含区域、摄像头编号、风险类型、持续时间、识别置信度、处置状态和关闭依据。视频流、人员定位、吊装状态和风速数据进入特征融合后形成风险评分、阵列热区和处置指令。误报事件记录触发画面和排除理由，漏报事件由巡查或复盘补录，训练集才能逐步覆盖光伏施工视觉条件。平台接口与门禁、排班、吊装设备和气象传感器保持统一时间口径，避免同一风险事件在不同系统中形成矛盾记录。多源数据融合路径见图 3。

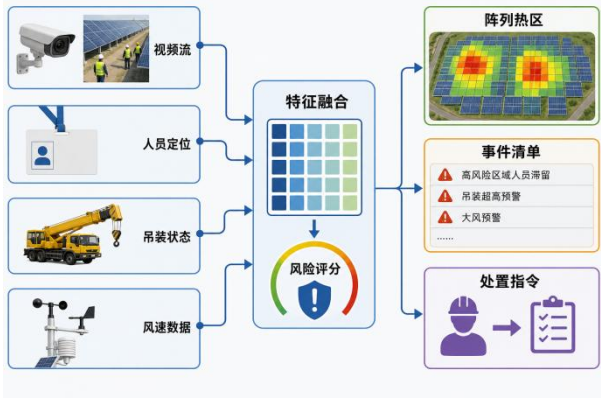


图3 施工多源安全监控数据融合

图3中，视频流、人员定位、吊装状态和风速数据先进入特征融合模块，再形成风险评分；右侧阵列热区定位高风险区域，事件清单保留原因，处置指令把平台判断传递给现场管理人员。

3 光伏电站施工安全监控数据分析

3.1 光伏阵列施工阶段安全风险评估

光伏阵列施工阶段的安全风险可按人员行为、设备状态、区域边界和环境扰动四类评价。人员行为包括PPE佩戴、攀爬、奔跑穿行和危险区滞留；设备状态包括吊车支腿、臂架回转、运输车辆倒车和临时用电；区域边界包括吊装禁入区、阵列通道、沟槽和屋面边缘；环境扰动包括大风、雨雪、扬尘和夜间照明不足^[6]。评估结果要区分发生概率和后果强度，未戴安全帽频率可能较高，但吊装下方闯入或临边未系挂的后果更重；平台可按区域热度、持续时间和重复人员形成风险排序，并把低可见度画面交给人工复核。

3.2 视频识别数据与风险阈值对比分析

视频识别进入安全判断前应设置置信度阈值、持续帧数阈值和空间距离阈值。阈值低于0.50时，反光组件、堆料和半遮挡人员容易进入候选事件；阈值高于0.90时，远距离小目标和逆光下PPE缺失容易漏检^[7]。识别置信度阈值由0.50提高到0.90时，误报警指数由1.05降至0.35，降幅为0.70；其中0.50至0.70区间下降0.47，0.70至0.90区间下降0.23，边际收益降低。吊装区越界按1min强制核查，高处未系挂按2min复核，普通通道滞留可按5min提醒，不同事件不能共用同一阈值。时间窗综合风险评分见式（2）。

$$R_t = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - w_i c_i s_i e^{-t_i/T_c}) \quad (2)$$

式（2）中， R_t 为时间窗综合风险评分，单位为无量纲； i 为风险因子序号， n 为风险因子数量， w_i 、 c_i 和 s_i 分别为第 i 项权重、识别置信度和后果等级系数，均为无量纲； t_i 为事件持续时间，单位为s； T_c 为时间衰减常数，单位为s。

时间窗风险评分能够把多项风险因子合成为预警排序，但平台还要判断复核后排除的告警、确认风险事件和平均复核耗时。

时。误报警修正指数把排除告警次数、确认风险事件次数、平均识别置信度和复核耗时放到同一关系中，用于比较阈值变化后的管理代价，并为规则版本调整提供量化依据。误报警修正评价关系见式（3）。

$$F_a = \frac{N_a}{N_a + N_t} (1 - c_m)^2 + \mu \frac{T_r}{T_0 + T_r} \quad (3)$$

式（3）中， F_a 为误报警修正指数，单位为无量纲； N_a 为排除告警次数， N_t 为确认风险事件次数，单位均为次； c_m 为平均识别置信度， μ 为处置迟滞权重，单位均为无量纲； T_r 为平均复核耗时， T_0 为基准处置时间，单位均为分钟。

风险评分和误报警修正公式给出阈值评价口径后，还要观察阈值连续变化对误警的影响。曲线把0.50至0.90的识别置信度阈值放在同一横轴下，并把1.05至0.35的误报警指数放在纵轴下，便于判断误报警下降是否仍具有明显边际收益，也便于发现阈值过高造成的漏检余量压缩。该关系也是人工复核策略调整的依据。识别阈值响应关系见图4。

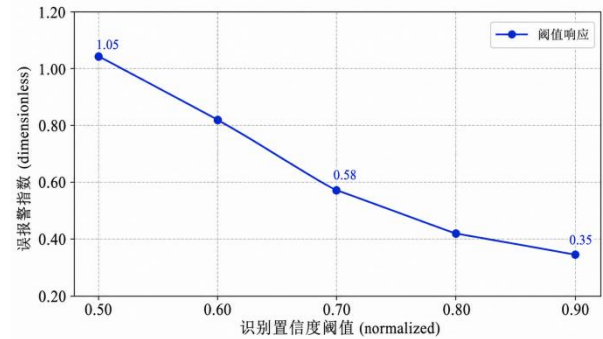


图4 识别置信度阈值与误报警指数关系

图4中，识别置信度阈值由0.50提高到0.90，误报警指数由1.05降至0.35，0.70以后曲线斜率变缓，说明继续提高阈值会压缩远距离和遮挡目标的识别余量。

3.3 施工多源安全监控数据融合分析

施工安全监控不能只依赖单路视频。定位标签能够补充人员停留轨迹，设备状态能够提示吊机回转、车辆倒车和临电负荷，气象数据能够解释大风、强光和降雨对识别稳定性的影响。多源融合平台应先统一时间戳和区域编码，再把视频事件、人员位置、设备动作和天气变化合成为同一风险队列。若视频提示人员靠近吊装区，而定位标签仍在安全通道，应触发复核；若吊机回转、人员接近和风速增大同时出现，则直接形成高优先级事件。融合分析的价值在于降低单源误判，并让处置责任落到区域、班组、设备和时间窗。

4 结语

基于AI视频识别的光伏电站施工安全智能监控，应以视频采集质量、行为识别规则、电子围栏联动和数据平台融合为核心。系统建设不能停留在算法展示层面，而要把阈值、持续

时间、空间边界和复核机制转化为可执行的安全处置。对吊装区、高处作业、临电区域和车辆通道等高风险场景,应采用分级阈值和多源核验方式,降低误报警对现场管理的干扰。随着

施工阶段变化,监控规则还应随阵列铺设、电气接线和并网调试不断更新,才能让智能识别持续服务施工安全。

参考文献:

- [1] 姚世大.基于 PDCA 循环的光伏电站施工安全管理体系优化研究[J].湖北应急管理,2026,(4):28-30.
- [2] 毕大成.光伏电站工程施工危险源辨识及施工安全管理探讨[J].光源与照明,2024,(8):114-116.
- [3] 山赵宁.基于数字孪生的光伏电站智能监控与故障诊断技术[J].中国新技术新产品,2026,(1):39-41.
- [4] 孙佳叶.光伏电站智能监控系统的故障诊断研究[J].光源与照明,2025,(7):174-176.
- [5] 武继聪,李运超,崔淼.融合深度学习的光伏电站智能监控系统[J].电气时代,2025,(6):52-55.
- [6] 史铁.光伏电站智能监控系统设计与应用[J].智能物联技术,2024,56(2):101-105.
- [7] 栾少鹏.光伏电站智能监控与预测性维护技术研究[J].现代制造技术与装备,2023,(S1):1-3.