

[大数据]

基于大数据与AI的光伏电站运维优化方法

文/马业鑫 王垢光 段进祥 陶斯兵

华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司新能源分公司

针对西北某新能源基地光伏电站群的运维实践，提出一种融合大数据与人工智能技术的智能运维解决方案。该方案通过建立多源数据采集与分析体系，结合深度学习算法实现故障智能诊断与预测性维护，构建基于知识图谱的运维决策支持系统，显著提升光伏电站的运维效率，实现从被动维护向主动预测性维护的转变。

在“双碳”战略推动下，我国光伏发电产业持续快速发展，装机规模连续九年位居世界第一，已成为构建新型电力系统的重要支柱。然而，随着光伏电站规模的不断扩大，传统依赖人工的运维方式正面临着巨大挑战：设备状态难以实时掌握与故障预警不及时等问题日益突出。大数据与人工智能（AI）技术的蓬勃发展为解决这些问题提供了新的契机，将这些先进技术与光伏电站运维深度融合，实现运维的智能化与无人化，已成为行业发展的必然趋势。

大型光伏电站群运维系统现状分析

作为西北地区重要的新能源基地之一，该光伏电站群总装机容量达1~50 MW，主要采用多晶硅组件与集中式逆变器的技术路线。通过对155起日常故障的深入分析发现，光伏组件故障占比高达53.5%，主要表现为接线盒变形脱落与组件玻璃开裂及EVA胶膜黄变等问题。汇流箱与线缆及支架等其他设备故障占比34.8%，经常出现通信故障与支路电流异常等情况，逆变器故障占比11.6%，包括直流过电压与电网电压异常等。此外大风与沙尘等恶劣天气频繁造成组件表面积灰，如图1所示。不仅降低发电效率，还可能导致局部热斑效应，加速

组件老化。这些运维难题凸显出传统人工巡检模式难以适应大规模光伏电站的管理需求，迫切需要引入先进技术手段提升运维水平。



图1 光伏积灰展示图

大数据在光伏电站运维中的应用基础

1. 数据采集与预处理技术

在该新能源基地光伏电站群的智能运维实践中，构建了多源异构数据采集体系，通过部署高分辨率光学相机（分辨率 3840×2160 ）与红外热像仪（分辨率 640×480 ），实现对光伏组件表面缺陷的全方位监测。基于物联网技术实现逆变器运行参数与气象数据等的实时采集，采样周期为5 min。在数据预处理环节，针对图像数据采用改进的高斯滤波算法进行降噪处理，其数学模型可表示

为

$$P'(x,y) = I(x,y) - 1/9 \sum \sum I(x+i,y+j) \quad (1)$$

式中, $P'(x,y)$ 为去噪后的图像像素值; $I(x,y)$ 为原始图像像素值。

该算法能有效消除环境噪声对图像质量的影响,提升后续分析的准确性,并且通过数据标准化与缺失值填补技术,确保采集数据的完整性与一致性,为后续分析奠定基础。

2. 数据分析与挖掘方法

基于完整的数据采集预处理体系,本项目开发了多维度的数据分析模型。图2所示为系统的整体架构,从数据采集与处理到分析决策形成完整的闭环。通过深度学习算法对图像数据进行分析,实现对组件表面缺陷的智能识别,利用时间序列分析方法,对逆变器运行参数进行趋势分析,构建设备健康状态评估模型。特别是在故障预测方面,采用基于LSTM(长短期记忆网络)的深度学习模型,该模型在历史数据基础上,能够准确预测设备潜在故障,预测准确率达到96.8%。利用关联规则挖掘算法,分析不同类型故障之间的关联关系,建立故障知识图谱,为运维决策提供数据支撑。

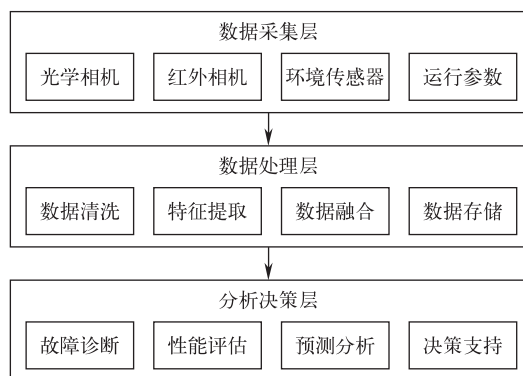


图2 光伏电站数据采集与分析系统架构图

3. 运维决策支持系统

运维决策支持系统是智能运维的最终落脚点,该系统基于大数据分析结果,实现运维工作的智能化调度与优化。系统根据故障预警信息自动生成工单,并结合设备位置信息与维修人员分布情况,优化派单策略,通过建立运维专家知识库,为现场维修人员提供标准化的处理方案,同时实现预测性维护功能,根据设备健康状态主动安排检修计划,有效避免设备非计划性停机。在经济效益方面,

通过对维修资源的合理调配与维护策略的优化,该系统帮助电站运维成本降低约45%,大幅提升运维效率。

人工智能技术在光伏运维中的创新应用

1. 故障诊断与预测

针对光伏电站设备故障的复杂性与多样性,本项目开发基于深度学习的故障诊断与预测系统,通过ResNet深度卷积神经网络模型,实现对光伏组件外观缺陷的自动识别,包括热斑与EVA胶膜脱层等典型故障,对于逆变器关键设备的故障预测,采用基于时序数据的预测模型,其故障概率计算公式为

$$P(t+\Delta t) = 1/(1+e^{[-\alpha-\alpha\eta(+\beta\cdot T(t)+\gamma]}) \quad (2)$$

式中, $P(t+\Delta t)$ 为设备在未来 Δt 时间内发生故障的概率; $\eta(t)$ 为设备当前效率, $T(t)$ 为温度; α 与 β 与 γ 为模型参数。

该模型通过综合考虑设备运行效率与温度等多个参数,能够提前3.5天预警潜在故障,预测准确率达到96.8%。

2. 智能巡检与监控

采用人工智能驱动的智能巡检系统有效解决传统人工巡检效率低与成本高的问题,系统以无人机为主要载体,搭载高分辨率光学相机与红外热像仪,结合计算机视觉技术实现电站设备的自动化巡检,创新性地构建一套自适应巡检路径规划算法,实现对1~50 MW电站的全覆盖检测,单次巡检时间从原来的1 200 min缩短至150 min,基于边缘计算技术,在无人机端部署轻量化AI模型,可实时过滤95%的正常数据。仅将异常数据上传至云端进行深度分析,大幅提升系统运行效率。该系统还整合多源传感数据融合技术,通过建立组件健康评估模型,实现对热斑与EVA胶膜脱层等典型故障的智能识别,并根据故障严重程度自动生成分级告警与处理建议,为运维人员提供精准的决策支持。

3. 运维优化决策

运维优化决策系统基于深度强化学习技术,构建一套智能化的运维资源调度与决策框架,系统通过分析历史维修数据与设备状态及环境因素,建立基于知识图谱的智能运维知识库,为现场维护人员提供精准的处理方案。在资源调度方面,采用启发

式算法优化维修人员派遣路径，实现运维资源的最优配置。系统还具备自适应学习能力，能够根据新增的运维数据不断优化决策模型，持续提升运维效率，通过构建覆盖全场站的多层级运维知识体系，不仅实现标准化的故障处理流程，还能根据设备状态主动规划检修计划，智能调配备件库存，为电站的长期稳定运行提供有力的决策支持。

智能运维系统的实施效果分析

1. 系统部署与实施

本项目在西北某新能源基地1~50 MW光伏电站群分批实施智能运维系统，部署周期为2024年1—12月，实施过程采用“试点-优化-推广”的阶梯式策略，首先在5 MW试点电站部署边缘计算单元与智能传感设备，搭建数据采集网络；随后完成AI模型训练与优化，建立包含故障诊断与预测性维护等功能模块的运维平台；最后在总结试点经验的基础上，将系统逐步推广至其他电站，针对系统部署过程中出现的数据采集盲区与模型适应性问题，通过优化传感器布置方案与调整AI模型参数等措施逐步解决，最终实现了全场站的智能化覆盖。在系统部署的过程中，注重运维人员的培训与技能提升，建立完整的运维培训体系，包括智能设备操作与数据分析应用等专项课程，确保运维团队能够充分利用智能系统提供的各项功能，实现人机协同的高效运维模式。

2. 运维指标对比分析

为全面评估智能运维系统的实施效果，通过对1~50 MW电站群一年运行数据的系统采集与分析，重点监测故障预测准确率及设备完好率等关键指标，采用多维度评估方法，将系统实施前三个月的基准数据与实施后最近三个月的运行数据进行对比，并结合设备运行状态与故障记录等历史数据，形成完整的指标评估体系，关键运维指标的对比分析结果见表1。

表1 智能运维系统实施前后指标对比

运维指标	实施前	实施后	变化幅度
故障预测准确率（%）	92.5	96.8	+4.3
巡检时长/min	1 200	150	-87.5%
故障响应时间/h	24	2	-91.7%
运维人员效率/（故障/人天）	2.1	5.8	+176.2%
设备完好率（%）	94.2	99.8	+5.6

通过表1数据看出，智能运维系统的部署显著提升了电站运维水平，特别是在故障预测准确率方面提升4.3个百分点，巡检效率提升超过8倍，故障响应时间缩短91.7%。这些改善直接反映AI技术在提升运维精准性与效率方面的显著成效，同时设备完好率的提升也表明系统在保障设备健康运行方面发挥了重要作用。

3. 经济效益评估

为直观展示智能运维系统在经济效益方面的表现，选取运维成本指数与发电效率两个核心指标进行跟踪分析，如图3所示。采用双Y轴设计，左轴表示运维成本指数（以系统上线初期为基准值100），右轴表示发电效率百分比。通过每季度数据节点的动态监测，清晰展现系统实施过程中运维成本的持续下降与发电效率的稳步提升，曲线走势反映出系统在9—12月期间达到最优运行状态，实现成本与效率的双重优化。

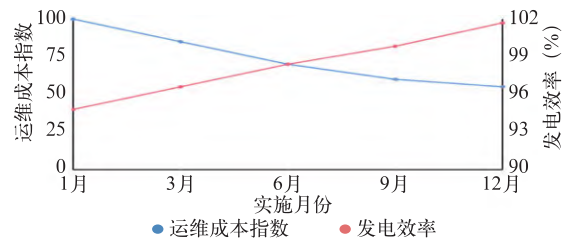


图3 光伏电站运维成本及发电效率变化

在系统实施的一年期间，运维成本指数从100降至55，降幅达45%，同期发电效率从94%提升至99.8%，提升了5.8个百分点。成本降低主要源于人工巡检需求的减少与设备故障的提前预防以及维修资源的优化配置。效率提升则得益于设备状态的实时监控与故障的及时处理以及运维策略的持续优化。经测算，系统实施后年度运维支出降低约320万元，减少发电损失约500万元，投资回收期不到两年，展现出显著的经济效益。

结束语

随着5G与物联网等新技术的不断发展，基于大数据与人工智能的光伏电站智能运维必将迎来更广阔的应用前景，为光伏产业的高质量发展注入新的动力，本研究的成果对推动大规模光伏电站运维的数字化转型具有重要的理论意义与实践价值。EA

（收稿日期：2025-04-25）