

数字孪生技术在集中式光伏电站运维中的应用

尚宇飞 康学卿 金 超

华能新能源股份有限公司蒙东分公司 内蒙古 通辽 029200

摘要：随着我国“双碳”战略的深入推进，集中式光伏电站装机容量持续攀升，但其传统运维模式正面临效率低下、成本高昂、故障响应滞后等严峻挑战。数字孪生技术通过构建物理电站的高保真虚拟映射，为破解这些难题提供了系统性解决方案。本文深入研究了数字孪生技术在集中式光伏电站运维中的具体应用。首先，系统梳理了当前集中式光伏电站运维的核心痛点，包括组件热斑、隐裂等隐性故障难以及时发现，逆变器等关键设备故障率高，以及人工巡检覆盖不全、效率低下等问题。其次，详细阐述了支撑数字孪生应用的关键技术体系，涵盖基于物联网与SCADA系统的多源异构数据融合、高精度三维建模与可视化、以及云边协同的计算架构。在此基础上，剖析了数字孪生的核心应用场景，包括智能巡检、预测性维护、发电效能优化等。最后，通过分析国内典型案例，探讨了该技术的有效性，并对未来发展趋势进行了展望，旨在为光伏行业的智能化转型提供理论参考与实践指导。

关键词：数字孪生；集中式光伏电站；智能运维；预测性维护；物联网；三维可视化

引言

全球能源结构变革下，光伏发电凭借清洁、可再生特性，成为我国能源转型核心支柱之一。截至2025年底，我国光伏累计装机容量超800GW，集中式光伏电站因规模效应和易管理，在西北、华北等光照资源丰富地区占主导。但规模扩张带来运维压力，其占地面积广、地理环境复杂且远离城市，传统依赖大量人力的运维模式在成本、效率 and 安全性上难以为继。传统运维靠定期人工巡检与事后维修，局限性明显：组件内部缺陷肉眼难察，全面检测成本高；电气设备故障突发，事后处理会导致发电量损失，还可能引发安全事故。因此，全面、实时、精准感知电站运行状态，实现主动预警和科学决策，是提升光伏电站全生命周期经济效益的关键。数字孪生技术为解决困境提供新路径，它能在虚拟空间构建与物理世界同步的数字化副本，打通两者壁垒。将该技术应用于集中式光伏电站，可实现从“被动响应”到“主动预防”、从“粗放管理”到“精细运营”的转变，是推动光伏产业高质量发展的必然选择。

1 集中式光伏电站运维的核心痛点

集中式光伏电站的运维挑战主要源于其规模大、分布广、环境恶劣及设备种类繁多等特点，具体可归纳为以下几类典型问题。

1.1 光伏组件的隐性故障诊断困难

光伏组件作为电站的核心发电单元，其健康状况直接决定了整体发电效率。然而，许多影响发电性能的故障具有高度的隐蔽性。（1）热斑效应（Hot Spot）：当部分电池片被鸟粪、灰尘、落叶或积雪遮挡时，该区

域无法正常发电，反而会消耗其他正常电池片产生的电能，转化为热量，导致局部温度急剧升高（可达200℃以上）。这种高温不仅会永久性地烧毁电池片，形成暗斑，降低组件功率，严重时甚至可能引燃背板材料，造成火灾。由于热斑通常发生在组件背面或内部，常规目视检查无法发现^[1]。（2）隐裂（Micro-crack）：组件在运输、安装或长期风载作用下，硅片内部可能产生细微裂纹。这些裂纹在初期不影响外观，但会阻断电流路径，导致有效发电面积减少，并随着时间推移加速组件老化和功率衰减。同样，隐裂的检测必须依赖EL测试等专业手段。（3）功率衰减：组件在长期运行中，受紫外线、湿热等环境因素影响，其输出功率会逐渐下降。准确评估每个组串乃至每块组件的实际衰减程度，对于制定科学的更换计划至关重要，但这在传统模式下几乎无法实现。

1.2 关键电气设备的高故障率与维护滞后

除组件外，逆变器、汇流箱、箱变等电气设备也是故障高发区，且其故障直接影响整个发电单元的运行。

（1）逆变器故障：作为光伏系统的“心脏”，逆变器负责将直流电转换为交流电。常见问题包括因电网波动导致的过压/欠压保护停机、散热不良引起的过热、内部元器件老化失效、以及直流拉弧等。传统运维往往是在监控系统报出故障代码后才介入，此时发电损失已然发生。（2）汇流箱与线缆故障：汇流箱内的熔断器熔断、接线端子松动氧化、直流线缆绝缘破损导致接地故障等问题，同样会导致组串失电。这些问题点分散且不易定位，排查过程耗时费力。

1.3 运维模式的低效与高成本

面对上述复杂的故障类型，传统的人工巡检模式显得力不从心。（1）覆盖不全与效率低下：一个百兆瓦级的电站，组件数量可达数十万块。依靠人工徒步巡检，不仅周期长，而且极易遗漏问题点。即使采用车载方式，对于地形复杂的区域也难以有效覆盖。（2）主观性强与标准不一：巡检结果高度依赖于运维人员的经验和责任心，缺乏客观、统一的评判标准，导致隐患排查的准确性和一致性难以保证。（3）高昂的人力与交通成本：在偏远地区，运维团队的差旅、食宿及车辆损耗构成了巨大的固定成本。同时，频繁的现场作业也增加了安全风险。

2 数字孪生技术体系架构与关键技术

为应对上述挑战，数字孪生光伏电站的构建需要一套完整的技术体系作为支撑，其核心在于实现物理世界与数字世界的深度融合。

2.1 多源异构数据的全面感知与融合

数据是数字孪生的血液。一个完整的感知网络需要整合来自不同系统的数据：（1）物联网（IoT）传感器层：在电站关键位置部署环境传感器（光照强度计、温湿度传感器、风速风向仪）和设备状态传感器（组件温度传感器、逆变器内部温度/电流/电压传感器）。这些传感器以高频率采集基础环境与设备运行数据。（2）SCADA系统：作为电站的传统监控核心，SCADA系统汇集了所有逆变器、汇流箱、气象站等设备的遥测（Telemetry）和遥信（Telecontrol）数据，如各组串的电压、电流、功率、设备开关状态及故障报警信息。这是最核心的运行数据来源^[2]。（3）无人机与机器人巡检数据：定期或按需出动搭载高清可见光相机和红外热成像仪的无人机，对全场组件进行自动巡检，生成高分辨率图像和热力图。地面巡检机器人也可用于特定区域的精细化检测。（4）数据融合引擎：上述多源数据通过边缘计算网关进行初步清洗、过滤和时间戳对齐后，上传至云端数据中心。在云端，利用大数据平台（如Hadoop, Spark）构建统一的数据湖，将结构化的SCADA数据、半结构化的日志数据以及非结构化的图像/视频数据进行关联与融合，为上层应用提供一致、完整的数据视图。

2.2 高保真三维建模与可视化

模型是数字孪生的骨架。其构建过程通常分为两步：（1）几何建模：利用无人机倾斜摄影测量技术，对整个电站进行航拍，通过专业的三维重建软件（如ContextCapture）生成厘米级精度的实景三维模型。该模型精确还原了每一排支架、每一块组件的位置、倾角和

朝向，以及所有电气设备（逆变器、箱变、电缆沟）的空间布局。（2）语义建模与数据绑定：在几何模型的基础上，通过BIM（建筑信息模型）或自定义的资产管理系统，为每一个物理实体（如某编号的逆变器、某组串的组件）赋予唯一的数字身份（ID），并将其实时运行数据、历史维护记录、设备参数等属性信息与之绑定。这样，点击三维模型中的任何一个对象，即可调取其全部相关信息。

2.3 云边协同的计算架构

为平衡实时性与计算深度，系统采用云边协同架构：（1）边缘侧：在电站本地部署边缘计算节点（如工业服务器）。它负责处理对实时性要求极高的任务，例如无人机巡检视频流的实时AI分析（即时识别热斑）、SCADA数据的异常检测（秒级发现逆变器停机）以及本地控制指令的下发（如自动调节清洗机器人路径）。这大大减少了对云端带宽的依赖，并确保了关键业务的低延迟响应。（2）云端：云端平台则承担计算密集型 and 全局性的任务，如基于全量历史数据的设备健康度预测模型训练、全站发电效能的多变量优化仿真、以及跨多个电站的宏观运维策略制定。云端强大的算力为深度智能分析提供了保障。

3 数字孪生在运维核心场景的应用

依托上述技术体系，数字孪生技术在集中式光伏电站运维中展现出强大的应用价值。

3.1 智能巡检：从“人巡”到“机巡+智判”

数字孪生平台彻底革新了巡检模式。运维人员无需亲临现场，即可在指挥中心的三维可视化大屏上启动巡检任务。平台自动规划无人机飞行航线，确保无死角覆盖。无人机回传的红外图像与三维模型自动配准，AI算法（如基于卷积神经网络的目标检测模型）会自动比对每块组件的温度分布，精准定位并标记出温度异常的热斑区域，同时生成包含故障位置、严重等级和疑似原因的详细报告^[3]。对于可见光图像，AI也能识别出组件破损、背板鼓包、植被遮挡等外部缺陷。这种“机器人、智能研判”的模式，将巡检效率提升了数十倍，且结果客观、可追溯。

3.2 预测性维护：从“坏了再修”到“未坏先防”

这是数字孪生最核心的价值所在。平台通过持续学习设备的历史运行数据，构建预测性维护模型。（1）逆变器健康度评估：模型会综合分析逆变器的输入/输出电压电流、转换效率、内部温度、风扇转速、故障历史等多个维度的特征。通过与同型号健康设备的基准曲线进行对比，或利用LSTM等时序模型预测其关键参数的未来

走势,系统可以量化评估每台逆变器的健康指数(Health Index)。当健康指数低于预设阈值时,系统会提前数周甚至数月发出预警,并推荐具体的维护措施(如清洁散热片、更换电容),从而避免非计划停机。(2)组件性能衰减分析:通过对每个组串的I-V曲线进行长期跟踪和横向对比,结合环境光照和温度数据进行归一化处理,平台可以精确计算出各组串的实际功率衰减率。对于衰减异常的组串,系统会将其标记为重点关注对象,并建议进行EL测试以确认是否存在隐裂等内部损伤,为精准更换提供数据支持。

3.3 发电效能优化:从“经验驱动”到“数据驱动”

数字孪生平台还能作为一个强大的仿真沙盘,用于优化电站的整体运行策略。(1)智能清洗决策:平台通过分析组件表面灰尘积累模型(结合降雨、风沙等气象数据)、当前发电损失估算以及清洗成本,可以计算出最优的清洗时机和范围。它能精准识别出哪些区域因灰尘遮挡导致的发电损失已超过清洗成本,从而指导清洗机器人进行靶向作业,避免了盲目、全覆盖式的无效清洗^[4]。(2)阴影分析与布局优化:在三维模型中,平台可以模拟一天中任意时刻太阳的位置,并精确计算出周围地形、建筑物或自身阵列可能产生的阴影遮挡情况。这不仅有助于解释历史发电数据中的异常低谷,更能为未来新增阵列的布局设计提供科学依据,最大限度地减少阴影损失。

4 应用案例分析:柯拉光伏电站的实践

位于四川省甘孜州雅江县的柯拉光伏电站,作为全球海拔最高、规模最大的水光互补电站,其运维环境极为严苛。该项目成功部署了先进的数字孪生平台,成为行业标杆。该平台实现了全场景三维建模还原,运维人员可在虚拟环境中“身临其境”地掌握设备运行状况。通过部署海量传感器形成的“感官网络”,结合无人机定期自动巡检,实现了对全场设备状态的无死角监控。

基于云边协同架构,边缘侧负责实时处理巡检视频流和SCADA告警,确保对热斑、逆变器停机等事件的秒级响应;云端则利用大数据和AI技术,对设备进行健康度评估和寿命预测。自平台投运以来,柯拉电站的故障平均修复时间(MTTR)显著缩短,运维人力成本大幅下降,年发电量得到有效保障,充分验证了数字孪生技术在大型集中式光伏电站运维中的巨大潜力。

5 结语

数字孪生技术正深刻改变着集中式光伏电站的运维范式。通过构建一个集全面感知、精准映射、智能分析和科学决策于一体的虚拟空间,它有效解决了传统运维模式在故障诊断、效率提升和成本控制方面的固有瓶颈。从智能巡检到预测性维护,再到发电效能优化,数字孪生的应用已展现出清晰的价值链条。展望未来,随着人工智能算法的持续进化、边缘计算能力的进一步下沉以及5G/6G通信技术的普及,数字孪生光伏电站将变得更加智能和自主。未来的系统或将能够实现更高精度的故障根因分析、全自动化的运维任务调度,甚至与电力市场交易系统联动,实现收益最大化的智能运行。可以预见,数字孪生将成为集中式光伏电站迈向“无人值守、少人值班”智慧化运营的标配,为我国清洁能源事业的高质量发展注入强劲的数字动能。

参考文献

- [1]迟军锋,王备,孟凡亮.数字孪生技术在光伏电站智能运维中的应用[J].标准生活,2025,(08):323-325.
- [2]高鑫.数字孪生技术在光伏电站运维管理中的应用[J].电力设备管理,2025,(02):171-173.
- [3]楼梁.浅析数字孪生光伏电站运维平台的设计与开发[J].中国设备工程,2024,(19):92-94.
- [4]何剑峰,秦政阳.基于数字孪生技术的分布式光伏智慧运维一体化平台[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S2):809-815.