

基于数字孪生与人工智能的光伏电站安全生产技术体系构建

水华伟

渭南峡阳新能源发电有限公司, 陕西 渭南 715300

DOI:10.61369/EPTSM.2025120014

摘要： 本文系统探讨了数字孪生与人工智能技术在光伏电站安全生产中的融合应用。通过构建“云边端协同、孪生体驱动”的分层技术架构，整合多源数据感知、动态风险预警与智能决策支持，形成“感知—认知—决策—执行”的闭环管理体系。重点研究了基于多源数据融合的设备健康评估、气象耦合的风险模拟及运行异常预警方法，并进一步提出面向风险处置的协同决策机制——借助数字孪生进行仿真推演与方案验证，结合人工智能多目标优化算法实现处置策略的生成与优选，以及预防性维护策略与人机协同应急演练平台。最终推动光伏电站向自主化、智能化与可持续的安全运营模式演进。

关键词： 数字孪生；人工智能；光伏电站；安全生产；闭环管理

Construction of Safety Production Technology System of Photovoltaic Power Station Based on Digital Twin and Artificial Intelligence

Shui Huawei

Weinan Xiayang New Energy Power Generation Co., Ltd. Weinan, Shaanxi 715300

Abstract： This paper systematically explores the integrated application of digital twin and artificial intelligence technologies in the safety production of photovoltaic power stations. By establishing a hierarchical technical architecture featuring "cloud-edge-device collaboration and twin-driven operations," the framework integrates multi-source data sensing, dynamic risk prediction, and intelligent decision support to form a closed-loop management system of "perception cognition decision execution." The study focuses on equipment health assessment based on multi-source data fusion, weather-coupled risk simulation, and operational anomaly warning methods. Furthermore, it proposes a collaborative decision-making mechanism for risk response—leveraging digital twins for simulation and solution validation, combined with AI multi-objective optimization algorithms to generate and prioritize response strategies—along with proactive maintenance strategies and a human-machine collaborative emergency drill platform. Ultimately, it aims to promote the evolution of photovoltaic power stations toward autonomous, intelligent, and sustainable safety operation models.

Keywords： digital twin; artificial intelligence; photovoltaic power station; production safety; closed-loop management

随着光伏电站规模持续扩大与运行环境日益复杂，传统安全生产模式在风险预见性、响应速度与管理精细化方面面临严峻挑战^[1]。数字孪生与人工智能技术的融合为电站安全管理提供了全新路径。本研究旨在构建一套数字孪生为交互核心、以人工智能为决策支撑的安全生产技术体系，通过虚实映射、智能分析与闭环优化，进而将安全管理从被动性危机解决状态转移到积极的风险预防状态，以寻求以整体视角对太阳能发电场的高可靠、高效及智能化运行的一体化解决方案。

一、新技术体系总体架构设计

(一) 体系构建的理论基础与核心逻辑

数字孪生绝非简单的三维模型，而是集成了物理、几何、规

则与行为的多维度、多概率的虚拟仿真系统^[2]。数字孪生与光伏电站安全生产的结合，其本质是构建一个持续性学习、同步性演进的能力。人工智能则赋予了这一虚拟体理解、分析、预测与决策的能力。两者的结合主要基于这样的理念：利用数字孪生提供

的实时、整体和高精度的数据信息源和试验系统，使用人工智能来分析和发现数据之间的深层联系并制定出最佳执行方案，再通过数字孪生验证与反馈，使过程从“事后应对”变为“事前预判和实时控制”，形成一个“感知-认知-决策-执行”的闭环，不仅实现了对光伏电站全生命周期的精准映射与实时干预，更推动安全生产管理模式从被动响应向主动预警与自适应调控的根本转变。

（二）分层融合的技术架构蓝图

该体系采用“云边端协同、孪生体驱动”的分层架构。在设备边缘侧，部署智能传感器和物联接口等组成系统的最基本单元，实时采集组件电流电压、逆变器运行状态、支架应力、环境温度湿度辐照度乃至视频图像等多模态信息^[9]。这一层的关键在于感知的广度与精度上获得突破，这是使数字孪生具有鲜活特征的关键。在网络与平台层，运用工业互联网及云边计算技术构建电站级的数字孪生体。该孪生体包含资产模型、行为模型、规则模型及知识模型等，是实体电厂的一种高度精确的数字化孪生。它不仅以静态描述设备的位置关系及关联，还可以动态建模其运行过程以及运行机理。在应用智能层，集成一批人工智能引擎，包括图像识别、序列预测、异常分析、策略优化、自然语言等，好比大脑不同区域，对孪生体数据流进行并行处理与深度挖掘。最终通过综合、一体化的可视交互入口，为运维人员呈现综合分析结果和决策建议等，实现由数据到认知到应用。

（三）数据流转与知识沉淀的核心机制

体系的核心在于高质量的信息流和连续的知识沉淀。要建立统一的数据标准和语义框架，保证所有信息（从零部件到电子设备）都可以被统一，避免各个环节的信息壁垒，建立从基础数据、性能数据、模型参数到决策知识的数据管道，实现数据的价值提炼。使用人工智能模型生成诊断规则、故障先兆特征、优化策略参数，将作为“数字资产”反哺并更新数字孪生体的知识模型与规则库，使得整个体系具备自我进化能力^[4]。该数据流转机制为分层架构的高效运转及孪生体与AI模块的深度融合提供核心支撑

（四）数字孪生体与人工智能模块的集成融合模式

融合的关键在于双向驱动与深度耦合。一方面，数字孪生为AI训练提供海量、带有时空标签的仿真与真实混合数据，大大丰富了机器学习的故障样本^[9]。通过于高保真孪生模型中引入各种事先设定的预设的故障和极端工况的情况，生成于现实世界非常难以获取或成本高昂的异常数据，从而有力地解决了安全生产中正样本多、负样本稀少的现实难题。另一方面，人工智能解析得到的结果，如机械装置的健康等级、危险的热分布、发生故障的概率等可直接作为动态属性的驱动去指导数字孪生体的可视化显示，使看不见的危害可视显影。

二、全场景动态风险感知与智能预警机制

（一）基于多源异构数据融合的设备健康状态评估

突破单一参数阈值告警的局限性，而是以智能化对多源时序数据进行融合分析与关联挖掘。例如，综合组件输出特性曲线走

势、红外热斑图像、无人机高速扫描成像和历史维修记录等，结合卷积神经网络、长短时记忆网络等深度学习算法，不仅可以识别有无PID、隐藏裂纹、热斑等，还可以预测功能折损速率及其尚可使用寿命周期，实现了预知维护^[6]。对于如逆变器、配电柜等关键功率装置，组合运用三相电流与电压谐波、外壳振动频谱范围、器件内部关键部位热场分布、冷却风扇运行状态等多种信息并基于图形神经网络等新技术构建装置的运行图谱和健康基准，检测机械零件松动、绝缘层断裂、电容老化等问题，从“好/坏”二值评估，到不间断的健康状态评估，为其风险管控提供梯度依据。

（二）耦合气象与环境因子的场站级风险演化模拟

利用数字孪生体集成高精度数值气象预报数据、地理信息系统数据、地质勘测数据以及电站精细三维地貌模型^[7]。当预报未来可能出现大风、暴雪、极端低温、扬沙和沙尘暴以及雷电等恶劣天气时，由人工智能指导的数字化孪生体可以启动多个物理场耦合交互的仿真分析软件，对各地分布式光伏组件的结构载荷、积雪深度及其滑落路径、温度传导变化情况、白雪覆盖程度的变化展开评估，如仿真不同风力方向组合作用下，光伏支架结构的振动响应和载荷分布情况，标记可能出现疲劳破坏和刚度超载的部位，以及模拟暴风雪过后不同角度的光伏组件积雪融化、滑落过程，发出可能对下端构件及支架施加冲击载荷等预警信息，以“天气输入-物理模拟-风险输出的定量可视化预测预警”的机制，将安全部署提升到基于数据进行判断决策的层次，实现早预防、早准备，进行高危区域的实时强化、巡检路线的优化、应急资源的预先准备等。

（三）基于行为识别与模式挖掘的运行异常智能预警

电站运行异常不仅仅是电力设备的问题引起的，也可能由制系统误动作、并网点电能质量恶化、阴影遮挡变化或人为操作失误导致^[6]。通过用人工智能的方法学习分析历史的运行数据和SCADA信号，建立不同季节、不同天气条件和不同载荷情况的“正常运行特征数据库”，通过流水线技术对比分析实时数据流，通过独立树、自动编码、时序分解等非监督或半监督的方法识别如发电量曲线的剧烈偏离、汇流箱丢失电量的不断上升、逆变器转换效率的意外减少、整个电站发电总功率因数的变化等，这些都是比较严重的设备绝缘变化、接头磨损、局部辐照面积的扩大和电网干扰等问题，这些都是潜在的问题，智能预警机制为运维人员提供了宝贵的干预时间窗口，避免了小问题演变为大事故。

（四）自适应与可解释的预警模型迭代优化

预警模型的精确性和稳定性至关重要。体系引入在线学习、增量学习与迁移学习机制，使预警模型可以根据新电站的运行数据、新出现的故障类型，以及误报漏报的反馈进行自适应微调与优化，持续增强其泛化能力与场景适应性。同时，为了克服人工智能模型常被视为“黑箱”的障碍，体系深度融合可解释AI技术，发出预警的同时给出清晰的决策支持追溯，如用高亮表格列示引发报警的关键特征参数及其贡献率，形成自然语言解释：“这次报警主要来源于第3分区的15台单元，过去2小时内这些单元的后部温度始终保持35°C以上且高于背景环境温度，同时温差直

线上涨，且该单元输出的电流量比历史水平增加20%，因此判断严重过热缺陷可能性高”，该解释显著提升了报警的可信赖及操作员的决策信心，帮助其快速准确把握问题焦点，并找到问题的根本原因所在。

三、智能决策支持与自主优化闭环

(一) 面向风险处置的协同决策支持系统

当预警事件触发后，该系统做出的不仅仅是警告，还会在系统中自动化地进行智能决策辅助^[9]。数字孪生体作为“作战沙盘”，立刻调取故障设备或风险区域的全息数字档案，包括设计图、技术规格、历史维修记录、相关的设备网络布局 and 当前运行情况等。“人工智能决策引擎”充当“智慧的智囊团”，并且利用风险级别、当前天气情况、电网控制命令、发电策略、可执行运行维护资产的状态和备用部件的数据，应用多目标限制优化算法、博弈论或强化学习模型产生多个解决方案及其结果的预测等。通过对数字孪生体仿真测试与预测，在其中可以测试出各种预案计划带来的效果以及费用成本与可能产生的副作用，并根据仿真测试结果为其进行排序和最优选择，同时把最优的结果以及三维虚拟与仿真结果直观地演示给领导，实现从“人找信息”到“信息找人、方案找人”的转变，辅助其进行科学、快速、精准的决策。

(二) 基于全局优化的预防性维护与运行策略调整

体系从更深层次推动安全与效能的协同，实现资产管理的最优化^[10]。通过系统同时监控所有站点各设备的健康程度和预期寿命，AI可建立设备群体失效概率时间曲线，并且结合未来的发电预期、电力市场电价信息、维修组工作负载等因素，利用运营研究优化技术如动态规划、队列理论，制定全场地各设施的低成本，且低风险的预防性维护计划时间表。在运营控制级别上，系统可实现实时识别由组件老化不均匀、遮挡区域的变化、尘埃分布不均等原因造成的影子损失和热区风险的关联故障，然后基于分布优化技术提出组模块级重新布局的建议，或者调整逆变器的多种高最大功率点跟踪模式。可在保证系统正常运行范围内积极平衡各部件的运行工况，延迟部分部件的长时间超载或低载运行风险的同时，提升系统整体发电效率，实现安全性与经济性的双赢。

(三) 人机协同的应急演练与安全培训沉浸式平台

利用数字孪生体高度仿真的特性与虚拟现实技术，构建沉浸式、交互式、可配置的虚拟应急演练与安全培训平台。平台可模拟典型灾害场景的典型故障如雷击着火、电缆沟进水、汇流箱短路爆炸、运维人员高空作业跌落或电气触电等，帮助操作人员使用虚拟电子设备处理危险情形，在临场感的模拟场景下开展必要的识别危险源、及时断电、抢救伤员、灭火等完整响应，通过人工智能作为智慧导师，实时监督操作动作、顺序和规范性，依据专家知识库判断操作行为是否规范、及时，并实时语音提示及引导，练习完成后自动生成练习的详尽分析报告并给出优缺点分析及各项指标的详细数据分析结果。

(四) 自主闭环控制与体系自适应进化

针对一些结构化、重复性强、低风险的调适、反应操作，系统可逐步实现一定程度的安全自我封闭式控制，减少人工重复劳动。例如，当智能摄像头检测到机器人在预定行进路线有物体堆积，或者有人在走路时，可基于数字孪生地图自动化制定并下发新的避障运行指令；当无人机巡检图像表明某具体阵列路段鸟类粪便污染较多时，系统可自动关联并调整后续的自动化清理设备作业计划及清理参数。更重要的是，系统整体结构具备自升级能力。所有处理事件的数据结果、维护人员的处置反馈、新未知的故障形态、外部的变化环境等均作为学习材料用于更新人工智能模型的参数和结构、修订数字孪生体的模拟物理特征、补充及扩充安全准则知识库，这样一来使得系统的生产安全管理可以在循环往复中不断增强，知识库也不断被充实扩展，最终推动光伏电站从自动化向智能化、再向具备韧性与智慧的自主化运营新形态演进。

总之，数字孪生与人工智能的深度融合，正推动光伏电站安全管理从“被动监测”向“主动感知”“被动判定”向“主动优化”渐进式升级。本文所提出的系统方法论，通过多层次风险预知、协同决策支撑、自适应优化迭代，能更好地解决电力设备早期隐患发现、精确预判掌控，未来随着技术迭代和数据丰富度提升，系统将演化为更灵活、自动的智能管理系统，将为光伏产业安全管理良性发展提供源动力。

参考文献

- [1] 张利琴. 数字孪生和人工智能技术在发电机组智能运维中的应用 [J]. 科技视界, 2025, 15(14): 1-4.
- [2] 段君艳, 辛社党, 崔明光, 王宏伟, 刘梦豪, 王强. 含能材料智能制造生产线本质安全设计及数字孪生技术应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2025, 60(4): 11-18.
- [3] 黄怀军. 人工智能技术在大型水电厂安全生产管理数智化中的应用 [J]. 中国高科技, 2025(18): 115-117.
- [4] 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(2): 171-173.
- [5] 苏贵兵. 基于人工智能技术的电力配网工程施工安全管理 [J]. 张江科技评论, 2025(5): 156-158.
- [6] 武文江, 郭俊卿. 光伏电站运维中人工智能技术的应用研究 [J]. 电力设备管理, 2025(2): 156-158.
- [7] 李长松, 王金辉. 基于 PDCA 循环的光伏电站安全生产管理研究 [J]. 机电安全, 2025(2): 14-17.
- [8] 周浩. 新能源光伏电站安全管理技术研析 [J]. 电力设备管理, 2025(6): 242-244.
- [9] 何邦权, 秦超, 张力欣, 陈冲, 李素梅. 基于数字化技术的全链条安全生产巡查创新与实践 [J]. 广西电业, 2025(6): 39-46.
- [10] 周海. 火电厂安全生产设备智能化技术发展趋势与前景分析 [J]. 中国设备工程, 2025(5): 42-44.