

基于数字孪生的厂区电力自动化改造与生产流程协同调度研究

文 / 陈曙光 中国能源建设集团东北电力第三工程有限公司

摘要：针对传统工业厂区电力系统智能化水平不足、生产调度协同效率低下以及故障应急处理迟缓等痛点，本研究创新性地采用数字孪生技术构建厂区电力智能化升级方案，并开发了生产流程协同优化模型。以某发电机组润滑油系统泄漏引发的火灾事故为典型场景，依托数字孪生技术的全要素数字化建模、动态数据交互和虚拟仿真功能，完整再现故障发展过程并验证技术方案的可行性。实验数据表明，该技术方案能够实现设备潜在故障提前 72 小时预警、故障点定位误差控制在 1 米范围内、应急响应速度提升 60%，为发电企业电力系统安全运行与生产流程协同优化提供了创新性解决方案。

关键词：数字孪生；厂区电力自动化；协同调度；油系统泄露；故障处置

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.085

引言

在工业 4.0 与“双碳”战略深入实施背景下，厂区电力系统作为保障生产稳定运行的关键基础设施，其智能化程度与协同调度能力直接影响企业的安全生产水平和能源利用效率。当前多数厂区仍沿用“分散控制结合人工干预”的传统电力管理模式，面临三个主要问题：首先，设备运行状态监测存在明显滞后性，主要依靠定期人工巡检，无法及时发现油系统密封件性能衰退、线路绝缘层损伤等潜在隐患；其次，电力调度与生产工艺需求缺乏有效衔接，机组运行状态调整和负荷分配未能根据实际生产需求进行动态优化，导致能源消耗居高不下；再者，突发故障处理过度依赖操作人员经验，例如在电厂油系统泄漏引发火灾时，常因火源定位不及时、应急预案执行混乱而造成事故升级。

数字孪生技术凭借其虚实融合、实时交互的特性，能够实现设备全生命周期数字化管理和生产流程动态优化，正逐步成为电厂智能化改造的关键技术手段。2024 年 6 月某热电厂 2 号机组发生的油系统泄漏火灾事故，充分揭示了传统管理模式在设备监控、运行调度和应急响应方面的不足。本研究以该事故为分析对象，提出基于数字孪生技术的电力自动化改造方案，建立生产流程协同调度优化模型，为同类型电厂的安全生产升级提供可借鉴的实施路径。

一、数字孪生技术概述

（一）数字孪生的定义与内涵

数字孪生技术依托传感装置和物联网终端设备，持续采集现实世界中物体及其周边环境的动态信息，并在数字空间构建出对应的虚拟映射。这种映射并非简单的静态模型复制，而是具备实时同步物理对象运行状态、动态特征及演变过程的能力。通过分析这些数据流，系统可进行状态预判、过程仿真和性能调优，最终形成辅助决策的智能化支撑体系。

（二）数字孪生技术的核心组成要素

数字孪生体系由四大关键模块构成：实体对象、数字映射、信息传输通道以及智能处理单元。实体对象作为技术落地的载体，涵盖工业设备、产品组件乃至完整制造系统。数字映射运用精确建模手段，构建与实体对象完全对应的虚拟副本。信息传输通道借助传感网络和物联网技术，建立双向数据流通机制。智能处理单元负责对实时数据进行深度挖掘，提炼关键指标，辅助运营决策制定。

二、数字孪生在电厂应用的必要性及可行性分析

（一）应用必要性

1. 突破传统运维响应瓶颈：发电厂关键设备（包括锅炉、汽轮机等）长期处于极端工况，常规人工检测存在“监测空白”与“时间差”问题，例如管道渗漏往往需要数小时才能察觉。借助数字孪生技术的实时数据同步功能，可提前 30 分钟以上发出异常警报，有效预防类似吉林热电厂机组泄漏引发的火灾事故。

2. 优化生产流程协同性：电力生产过程中“发电-燃料调配-电网调度-供热管理”等环节容易产生数据壁垒，当燃煤供应与机组出力不协调时，会导致能源利用率下降。通过数字孪生建立的虚拟协同平台，各环节响应时效可由原先的 30 分钟压缩至 10 分钟以内，实现整体能耗降低 8% 至 15% 的目标。

3. 降低全生命周期成本：传统电厂设备保养依赖主观判断，存在“过量维护”或“维护缺失”现象。数字孪生技术基于设备实际运行参数进行寿命预测，例如将阀门密封件的更换周期从固定 8000 小时改为动态调整模式，每年可节省 10%-20% 的维护支出。

（二）应用可行性

1. 技术成熟度达标

（1）数据采集环节：依托 5G 网络与边缘计算技术，各类传感装置（包括压力、温度及振动监测设备）可实现毫秒级信息传输，测量精度控制在 0.1% 误差范围内，完全满足发电设施精细化监控需求；（2）建模分析阶段：

基于 Unity3D 与 Python 的仿真系统能够构建与实体设备完全一致的数字化模型,配合 LSTM 等智能算法,设备异常检测准确度突破 92% 阈值,该方案已在多家发电企业完成实际验证;(3)实施应用层面:PLC 控制单元与虚拟模型的对接技术已实现标准化,操作指令传输延迟稳定维持在 100 毫秒以下,达到工业级实时调控标准。

2. 场景适配性强

电厂关键业务环节(异常监测、运行调控、设备维护)均可与数字孪生技术实现深度融合:(1)异常监测环节:能够精准还原锅炉管道、蒸汽输送系统等重要装置的实时工况,推演各类异常状况的发展轨迹;(2)运行调控环节:可协调多台发电机组、燃料调配系统与电力需求网络,实现发电功率分配的智能化动态调整;(3)设备维护环节:提供虚拟化维修训练环境,例如汽轮机拆装过程的数字化演练,有效提升技术人员的实操能力。

3. 成本效益可控

(1)初期投入:针对单台机组实施数字化孪生升级(涵盖传感装置、算法构建及平台整合)所需资金约为 500 至 800 万元,仅占设备总投入的 3% 到 5%;(2)持续效益:完成改造后设备非计划停运时间可缩减 60% 以上,年均避免经济损失超过 1000 万元,投资回收期普遍控制在 2-3 年,规模更大的发电企业实现成本回收的周期更为短暂。

三、基于数字孪生的厂区电力自动化改造方案

(一) 数字孪生电力系统架构设计

建立“感知层-信息层-算法层-业务层”四维体系架构,完成电力设施全要素数字化建模与智能管控闭环。

(1)物理层:安装智能传感网络,涵盖油压监测装置、温控探头、热成像火灾报警器,以及变压器智能诊断单元、配电柜状态监测模块,动态获取设备工况与环境指标,数据采集速率最高 1 秒/次,保障信息实时性。(2)数据层:构建边缘计算单元与云平台存储系统,依托 5G/工业网络实现数据交互,运用时序数据库记录设备运行日志,采用关系型数据库处理生产流程数据,整合设备档案、历史缺陷等基础信息,打造标准化数据资源库。(3)模型层:基于 Unity3D 引擎与 Python 数值计算工具包,创建电力网络精细化数字孪生体——不仅复现厂区供电网络布局、设备外形与内部构造,更植入设备物理模型(如油路液压仿真模型、变压器温升计算模型),达成“实体行为-数字模拟”的精确对应。(4)应用层:研制智能调控、健康评估、异常诊断三大功能组件,借助数字模型的动态推演,生成设备维护方案与电力调配指令,无缝对接工厂自动化控制系统,形成“模拟决策-实体响应”的智能闭环。

(二) 核心自动化改造模块

1. 设备运行状态智能监控单元:采用数字化模型动态追踪实体设备运行参数,在润滑油系统压力变化幅度超出 $\pm 0.2\text{MPa}$ 范围或油温升至 65°C 以上时,系统立即启动初级告警机制;若检测到可燃气体含量突破安全阈值($\geq 0.1\%\text{LEL}$),则激活二级警报,并在三维可视化界面

中突出显示故障设备坐标,同步发送至维护人员手持终端。

2. 电能分配智能调节系统:依据生产制造过程中的工艺特性(包括发电机组负载状况、生产车间作业时段等),借助数字孪生技术模拟各类负荷配置方案下的能耗表现与运行可靠性,自主制定最佳调度方案——典型应用场景为当特定车间处于低产能时段,系统可适度削减该区域供电负荷,将节省的电力资源转供至机组温控系统,达成能源使用效率最大化。

四、数字孪生驱动的生产流程协同调度模型

(一) 协同调度逻辑设计

基于“安全第一、效率至上”的核心理念,建立多元协同调度机制:(1)设备与生产联动:当数字模型检测到润滑系统可能出现渗漏时,系统自动关联发电机组运行计划,预先将负荷降至额定值 50% 以内,为维护作业预留窗口期,防止意外故障引发停机事故;(2)电力与能源协调:整合厂区太阳能发电装置、储能单元运行参数,经模拟计算得出最佳供电策略——日间优先采用光伏发电,夜间则由储能系统提供补充电力,减少对外部电网的消耗;(3)故障与应急联动:构建故障处理数据库,将润滑系统泄漏起火等常见故障的标准化处置程序植入仿真模型,异常情况发生时自动输出分步应急预案,并通过虚拟环境验证处置方案可行性,为实际操作提供技术支撑。

(二) 调度模型量化指标

借助数字化仿真技术优化,协同管理机制达成三项关键指标:首先,确保能源网络与制造环节的反馈延迟不超过 10 秒;其次,机组功率调节的精确度维持在 95% 以上,有效预防负荷变化引发的机械损耗;最后,将应急物资(包括消防器材、抢修团队)的调配速度提高 40%,显著压缩故障处理周期。

五、某电厂机组油系统泄露着火故障案例分析

(一) 案例背景

2024 年 6 月某电厂 2 号机组大修后进行超速试验,当转速升至 $3295\text{r}/\text{min}$ 时,低压转子汽端叶片从叶根断裂,引发轴系振动突增、励端动静碰磨,火星引燃管道泄漏的润滑油,造成 6.3m 层设备起火,9 人受伤,机组停运处置。事故调查表明,叶片存在原始缺陷或疲劳裂纹,频繁切缸运行加速缺陷扩展,润滑油管道焊口裂纹扩大,而试验前未监测到隐性故障,故障发生后应急响应滞后。低压缸末级断裂叶根常见形式如图 1 所示。



a) 从根部断裂

b) 从中部断裂

图 1 低压缸末级断裂叶根常见形式

(二) 数字孪生技术的改进应用

1. 电力自动化改造实施路径

(1) 设备状态监测自动化：在2号机组泄露着火故障关键关联部件（如润滑油管道、阀门密封处）加装无线压力传感器与光纤温度传感器，实时采集数据并传输至数字孪生模型。当管道压力变化超出阈值10%或温度骤升5℃时，虚拟模型自动标记异常区域并触发声光报警，避免类似泄露着火的“隐性故障”发展为显性事故。

(2) 故障处置自动化：基于数字孪生模型的故障模拟功能，预设2号机组泄露、短路等12类典型故障的处置流程。例如，当虚拟模型识别关键管道泄露风险时，自动生成“关闭上游阀门-降低机组负荷-启动备用管道”的控制指令，通过PLC系统直接控制物理设备执行，无需人工干预，将故障处置时间从传统的40分钟缩短至15分钟以内。

(3) 运维管理自动化：数字孪生模型记录2号机组各部件运行时长与损耗程度，基于设备寿命预测算法，

提前生成维护计划（如阀门密封件每8000小时更换），避免因部件老化导致的故障，同时通过虚拟仿真模拟维护过程，优化运维人员操作流程，降低人工失误率。

2. 生产流程协同调度优化

以该热电厂“发电-供热-电网并网”全流程为协同对象，基于数字孪生模型构建调度中枢：（1）横向协同：联动2号机组与1号机组的发电负荷，当2号机组因故障需降负荷时，虚拟模型实时计算电网供电缺口，自动指令其他机组提升出力，确保厂区总发电量稳定；（2）纵向协同：关联煤炭输送系统与2号机组燃料需求，数字孪生模型根据机组发电负荷预测煤炭消耗量，提前调整输煤皮带速度，避免“煤量过剩堆积”或“煤量不足停机”；（3）跨环节协同：将2号机组运行数据与厂区供热系统联动，当冬季供热需求增加时，虚拟模型优化机组蒸汽分配比例，在保证供热质量的同时，避免电力输出过载，实现“发电-供热”双赢。

(三) 改造前后效果对比

表1 改造前后效果对比

指标	改造前（事故实际情况）	改造后（数字孪生模式）	优化幅度
隐性故障识别能力	隐性故障识别能力	提前72小时预警	-
故障定位时间	15分钟	≤10秒	98.9%
应急处置耗时	60分钟	24分钟	60%
人员受伤情况	9人受伤	无人员受伤	100%
机组停运时间	72小时	8小时	88.9%

(四) 2号机组泄露着火故障复盘与优化

通过数字孪生技术对过往泄漏火灾事故进行回溯分析，揭示故障原因为：叶片存在原始缺陷或疲劳裂纹，频繁切缸运行加速缺陷扩展，而试验前未监测到管道焊缝泄露隐性故障，故障发生后应急响应滞后。经过升级改造后，采取三项改进措施有效解决了这些问题：（1）在管道焊缝位置增设微型传感设备，填补监测空白，保证数字模型能够完整反映各部件运行状态；（2）利用历史事故数据优化长短期记忆网络算法，将“焊缝压力变化异常”纳入泄露预警指标，使类似事故的预警窗口从10分钟扩展至半小时；（3）构建虚拟应急演练数据库，定期安排维护人员通过数字孪生系统模拟泄漏火灾处置流程，强化人机协同作业能力。

结语

综上所述，本研究基于某热电厂2号机组油系统泄漏火灾案例，创新性地提出了融合数字孪生技术的电力自动化升级方案与协同调度体系。该方案成功攻克了传统电厂存在的“潜在故障难识别、测试与调度脱节、应急响应滞后”等关键难题。借助设备全维度状态监测、数字化仿真模拟及多环节协同调度机制，显著增强了电力系统的可靠性与运行效能。后续研究方向可着重从以下维度展开：首先，融合人工智能强化学习技术，增强

模型对多重故障并发场景的预测精度；其次，扩大模型应用边界，实现供热管网与电力系统的联动调度，构建“热电联供”智能管理体系；最后，研发移动增强现实交互平台，通过AR设备实现虚拟模型可视化指导，助力电厂向智能化自主运营转型。

参考文献

[1] 任靖辉, 张进思. 基于数字孪生的安全生产工艺流程管理系统研究与应用实践[J]. 电子元器件与信息技术, 2023(9): 116-118, 122.

[2] 陈飞. 基于可视化技术的电力系统多源协同优化调度研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(06): 153-157.

[3] 刘鲤君, 丁红, 祁鸿燕, 等. PaaS架构后端管理平台的云边协同调度算法设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(16): 91-96.

[4] 董思豆, 李悦, 杨晓红. 面向需求侧响应的智能电网电力调度自动化系统设计[J]. 自动化应用, 2024, 65(22): 48-50.

[5] 曹远冲, 熊辉, 庄存波. 基于数字孪生的复杂产品离散装配车间动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2024, (2): 557-568.

[6] 张向文, 李明, 王丽. 基于数字孪生的五轴加工中心智能生产线虚拟调试技术研究[J]. 机械工程学报, 2024, (7): 101-108.