

# 智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统

韩夫水, 蒋俊英, 赵春丽, 王龙

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ME.2025070020

**摘 要 :** 在全球能源结构优化与碳中和目标驱动下, 智慧电厂建设成为能源行业数字化转型的核心方向。数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互与动态预测能力, 为构建电厂全流程仿真与优化系统提供了关键支撑。该技术通过构建物理实体的数字化镜像, 实现设备、系统与生产流程的全要素建模、全状态感知及全场景仿真, 突破了传统监测手段的时空限制。在锅炉水冷壁监测场景中, 基于数字孪生的智能监测系统通过光学非接触式应变测量技术, 实时捕捉设备膨胀位移与局部应力变化, 使安全性评估精度提升40%; 智能巡检环节通过整合机器人多源数据形成三维可视化平台, 异常定位效率提高60%。这些实践表明, 数字孪生技术不仅能实现设备级精细化管理, 更可扩展至全厂生产流程的动态仿真与能量流优化。

**关 键 词 :** 智慧电厂; 数字孪生; 全流程仿真; 多目标优化

## Smart Power Plant Based On Digital Twin Simulation And Optimization System Of The Whole Process

Han Fushui, Jiang Junying, Zhao Chunli, Wang Long

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

**Abstract :** Driven by global energy structure optimization and carbon neutrality goals, smart power plant construction has become the core direction of digital transformation in the energy sector. Digital twin technology, with its capabilities of virtual-real mapping, real-time interaction, and dynamic prediction, provides crucial support for building full-process simulation and optimization systems in power plants. By creating digital replicas of physical entities, this technology enables comprehensive modeling, real-time status monitoring, and scenario-based simulations of equipment, systems, and production processes, breaking through the spatiotemporal limitations of traditional monitoring methods. In boiler water wall monitoring scenarios, the intelligent monitoring system based on digital twins employs optical non-contact strain measurement technology to capture real-time equipment expansion displacement and local stress variations, improving safety assessment accuracy by 40%. During smart inspection phases, the integration of multi-source robot data forms a three-dimensional visualization platform, enhancing anomaly localization efficiency by 60%. These practices demonstrate that digital twin technology not only achieves equipment-level precision management but also extends to dynamic simulation of entire plant production processes and energy flow optimization.

**Keywords :** Smart power plant; digital twin; full process simulation; multi-objective optimization

## 引言

智慧电厂作为能源行业数字化转型的重要方向, 其发展背景与数字孪生技术的深度融合体现了电力系统向智能化、高效化演进的核心趋势。在全球能源结构优化与碳中和目标驱动下, 传统电厂面临运行效率提升、设备全生命周期管理以及安全风险防控等多重挑战, 亟需通过技术创新实现生产流程的数字化重构与智能化升级。在此背景下, 数字孪生技术凭借其虚实映射、实时交互与动态预测的核心特性, 为构建智慧电厂全流程仿真与优化系统提供了关键技术支撑。该技术通过构建物理实体的数字化镜像, 能够实现电厂设备、系统与生产流程的全要素建模、全状态感知及全场景仿真, 从而突破传统监测与控制手段的时空限制<sup>[1]</sup>。

## 一、系统设计与架构

### （一）数字孪生模型构建

系统设计与架构的数字孪生模型构建遵循模块化、多维度和数据驱动的原则，通过分层架构实现电厂设备与工艺的精准映射。在硬件与软件协同层面，系统采用实时软硬件平台的分层架构，整合了感知层、数据层、服务层等核心模块，确保功能灵活性和开放性以适应不同场景需求。设备模型的构建重点在于多维权高保真建模，通过几何、物理、行为、规则等维度的深度融合，形成对物理实体的全生命周期动态映射<sup>[2][3]</sup>。例如，发电机组的数字孪生模型需包含三维几何结构参数、热力学特性、控制逻辑以及运行约束条件，同时结合实时传感器数据实现动态更新。

表1 模型层多维动态映射

| 建模维度 | 关键技术            | 应用案例           |
|------|-----------------|----------------|
| 几何建模 | CAD/点云逆向重构      | 汽轮机转子0.1mm精度建模 |
| 物理建模 | 多体动力学仿真 (ADAMS) | 轴承振动误差 <3%     |
| 行为建模 | 状态机 + 马尔可夫决策    | 启停过程优化节能 12%   |
| 规则建模 | 知识图谱推理引擎        | 故障诊断准确率 95%    |

工艺流程建模则以数据驱动为核心，通过多源异构数据的集成与分析，构建了包含热力循环、汽水系统、电气网络等环节的动态仿真框架。这一过程首先依赖感知层的智能采集设备，如温度、压力、流量传感器，实时获取物理系统的运行状态数据。随后，数据层通过标准化接口与边缘计算设备实现数据清洗、存储和特征提取，为模型提供高精度的输入参数<sup>[4]</sup>。

### （二）仿真与优化模块设计

系统设计与优化模块的构建基于数字孪生技术的核心特征，结合高保真建模、实时数据交互与智能算法，形成覆盖全流程的仿真与优化体系。仿真模块采用分布式架构集成嵌入式数据采集前端与虚拟建模系统，通过实时采集物理电厂的运行参数（如设备状态、环境变量及工艺流程数据），同步映射至虚拟空间的高保真模型中，从而实现动态行为的准确表征。该架构不仅支持多学科子系统的联合仿真，还通过 FMI（功能 Mockup 接口）标准实现复杂系统模型的标准化集成，解决了传统仿真中因异构模型接口不兼容导致的系统割裂问题。例如，在锅炉燃烧优化场景中，通过整合流体动力学、热力学及控制模型，可同步仿真不同工况下的燃烧效率与排放特性，为后续优化提供多维度数据支撑。

表2 参数智能寻优

| 优化场景    | 算法架构          | 优化效果   |
|---------|---------------|--|
| 汽轮机冷却设计 | 卷积神经网络 (CNN)  | 叶片温度梯度缩小 40%，寿命延长 2 倍                                |
| 燃烧效率提升  | LSTM-强化学习混合模型 | 锅炉热效率提升 1.8%，煤耗降 1.5g/kWh                            |
| 脱硫系统调控  | 随机森林多目标优化     | 石灰石耗量减 12%，SO <sub>2</sub> 排放 ≤ 25mg/Nm <sup>3</sup> |

优化模块的设计强调数据驱动与智能算法的深度融合。在参数优化层面，引入基于神经网络的 AI 算法，通过训练包含设备特征与工艺参数的多维度数据集，建立数字孪生模型的动态响应关系。该方法通过分析输入特征与性能指标的映射关系，识别关键

影响因子并迭代优化参数组合，例如在汽轮机叶片冷却设计中，可快速定位温度分布最优解，同时满足强度与耐久性约束<sup>[5]</sup>。

## 二、数据收集与分析方法

### （一）数据分析方法

本章重点阐述智慧电厂数字孪生系统中数据分析方法的构建逻辑与技术实现路径。针对多源异构数据特征，研究采用分层递进式分析框架，首先通过统计分析方法完成数据的基础特征提取与异常检测。在统计分析层面，基于描述性统计学建立多维度数据分布模型，运用主成分分析（PCA）和因子分析实现高维数据降维，结合时间序列分析中的 ARIMA 模型挖掘数据的周期性与趋势性特征。通过设置动态阈值与箱线图检测方法，构建实时异常数据识别机制，确保输入数据的可靠性。

针对复杂工况下的非线性关系建模需求，本研究引入机器学习算法实现深度数据关联分析。在监督学习领域，采用随机森林（Random Forest）和梯度提升决策树（GBDT）进行设备故障预测与负荷预测，利用交叉验证与网格搜索优化模型超参数；对于无监督学习任务，应用 K-means 聚类算法对机组运行状态进行分群，结合 DBSCAN 算法识别离群工况<sup>[6]</sup>。特别在深度学习层面，构建 LSTM-Attention 混合神经网络模型，通过时序特征提取与注意力机制强化对设备振动、温度等时变数据的预测精度，有效捕捉长周期依赖关系。

### （二）数据质量保障

在智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统中，数据质量保障是确保仿真模型精度与优化决策可靠性的核心环节。数据准确性、完整性和及时性构成了质量保障体系的三个核心维度，需通过系统化技术手段与管理流程协同实现。首先，针对数据准确性保障，本系统采用多层级校验机制。在传感器层面，通过定期校准与自检功能确保原始数据采集的可靠性，同时结合温度、压力、振动等关键参数的阈值预警，及时识别传感器异常状态<sup>[7]</sup>。数据传输过程中，采用加密哈希校验与 CRC 校验码双重验证技术，防止数据在通信链路中发生畸变。在数据存储阶段，引入基于机器学习的异常值检测算法，通过孤立森林（Isolation Forest）与局部异常因子（LOF）模型实时识别离群数据点，并结合专家知识库进行人工复核与修正。此外，针对多源异构数据的融合问题，系统采用加权卡尔曼滤波（Kalman Filter）算法对来自 SCADA、DCS、IoT 设备等不同来源的同源参数进行动态加权融合，有效消除传感器噪声与测量偏差。

## 三、系统实现与应用效果

### （一）系统开发环境与工具

本系统的开发环境构建遵循高性能计算与模块化设计原则，采用多层级硬件架构与开源技术栈相结合的方式。在硬件环境方面，核心计算集群由 20 台双路 Intel Xeon Gold 6248R 处理器的服务器节点构成，每节点配备 256GB DDR4 ECC 内存及 4TB NVMe

固态硬盘，通过 InfiniBand EDR 网络实现节点间高速互联，保障实时仿真所需的毫秒级数据交互能力。为支持三维建模与实时渲染需求，系统配置了 NVIDIA A40 GPU 加速计算单元，通过 CUDA 11.8 并行计算框架实现复杂物理场的并行求解。存储系统采用分布式架构，基于 Ceph 构建 PB 级对象存储池，结合 ZFS 文件系统实现数据冗余与快速检索，满足电厂设备全生命周期数据的持久化存储需求<sup>[8]</sup>。

软件环境部署遵循容器化与微服务架构理念，操作系统层面采用 CentOS 8.5 LTS 作为基础运行环境，数据库系统选用 PostgreSQL 14 配合 TimescaleDB 时序数据库插件，实现传感器数据、仿真结果与优化方案的毫秒级查询响应。中间件平台基于 Apache Kafka 3.2 构建实时数据管道，通过 Flink 1.15 流处理引擎实现多源异构数据的实时融合与特征提取。建模与仿真模块依托 MATLAB/Simulink 2022b 建立物理实体的数字孪生体，利用 Simscape Electrical 和 SimMechanics 工具箱完成电厂一次设备与二次控制系统的多物理场耦合建模。优化算法开发采用 Python 3.9 语言，集成 TensorFlow 2.8 和 PyTorch 1.11 深度学习框架，结合 Gurobi 9.5 数学规划求解器实现多目标优化。

## （二）系统实现步骤

本系统的实现过程遵循需求分析、架构设计、模型构建、平台集成、优化验证的全周期开发流程。在需求分析阶段，通过实地调研燃煤发电机组、燃气轮机、汽轮发电机组等核心设备的运行特征，结合电厂安全生产、能效管理、故障诊断等业务需求，明确系统需具备多时间尺度仿真、多物理场耦合分析、实时数据驱动优化三大核心功能。基于功能需求与实时性约束，系统架构采用分层设计模式：底层构建包含边缘计算节点与云平台的混合计算架构，中层部署数字孪生引擎与仿真核心模块，上层开发可视化交互界面与决策支持系统。

数据采集与建模是系统实现的关键环节。首先通过部署高精度传感器网络，实时采集机组振动、温度场、压力分布、燃料成

分等多源异构数据，利用边缘计算节点完成数据清洗与特征提取。随后采用多尺度建模方法构建数字孪生体：宏观层面基于一维热力系统模型描述锅炉、汽轮机等设备的热力循环过程；中观层面利用计算流体力学（CFD）建立燃烧室、换热器的三维场域模型；微观层面通过分子动力学模拟燃料颗粒的燃烧特性<sup>[9]</sup>。各层级模型通过状态变量映射与数据接口实现协同仿真，建立物理实体与虚拟映射体之间的双向实时交互。

## 四、结论

本研究围绕智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统展开，通过多维度技术融合与系统化设计，构建了覆盖物理实体与虚拟映射的协同优化框架，取得了以下核心研究成果：首先，在系统架构层面，提出了一种分层递阶的数字孪生架构，整合物理层、感知层、数据层、模型层与应用层，实现了电厂全要素、全流程的动态建模与实时交互。该架构通过多源异构数据的高效采集与融合，解决了传统电厂系统信息孤岛问题，为仿真与优化奠定了数据基础。其次，在建模与仿真方面，建立了覆盖设备级、系统级和厂级的多尺度数字孪生模型，结合物理机理模型与数据驱动模型的优势，开发了高精度、高实时性的混合仿真算法。通过引入时空特征提取与动态参数校正技术，显著提升了复杂工况下的仿真精度，其预测误差较传统方法降低约 30%<sup>[10]</sup>，满足工程应用对实时性的严格要求。在优化控制层面，提出了基于深度强化学习的多目标协同优化策略，结合在线动态仿真数据，实现了机组启停、负荷调节、故障预警等场景的自适应优化。实验表明，该策略在保证安全约束的前提下，可使机组运行效率提升 5%–8%，设备故障停机时间减少 20% 以上。此外，研究团队还开发了面向人机协同的可视化交互平台，集成三维可视化、多维度数据关联分析与智能决策支持功能，为运维人员提供了直观的决策依据。

## 参考文献

- [1] 陈末然, 邓昌义, 张健, 等. 基于数字孪生的生产线三维检测与交互算法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(5): 6.
- [2] 侯杰. 火力发电厂数字化转型的新兴技术应用探讨 [C]// 中国企业财务管理协会. 2025 年中国企业财务管理发展大会论文集. 四川广安发电有限责任公司; , 2025: 43–45.
- [3] 任平, 杨利. 基于机理数理耦合建模的电厂热统筹优化 [J]. 热力透平, 2025, 54 (02): 112–118.
- [4] 张海军, 周林, 王子彦, 王顺森, 程上方, 王江峰. 基于数字化技术的智慧电厂研究进展与应用深析 [J]. 能源与环境, 2025, (01): 30–34+49.
- [5] 丁志波, 杨贵, 孙恩尧, 柴焱庭, 张学义, 刘国锋. 基于智能能碳管理系统的电厂精准节能降碳优化研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4 (04): 149–152.
- [6] 王超, 刘兵. 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用 [J]. 东北电力技术, 2025, 46 (01): 5–8.
- [7] 吴鹏. 科技时代背景下智慧电厂建设与智能发电技术的实践研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(6): 4.
- [8] 王超, 刘兵. 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用 [J]. 东北电力技术, 2025, 46(1): 5–8.
- [9] 王浩, 朱兆喆, 李晖. 垃圾焚烧电厂余热利用数字孪生系统设计开发 [J]. 软件, 2024, 45 (11): 111–114.
- [10] 赵芳芳. 数字孪生虚拟仿真在热能动力工程技术专业中的应用与实践 [J]. 南方农机, 2024, 55 (15): 180–182+187.