

# 面向数字孪生的锅炉三维可视化系统设计与应用

张帅

华电伊犁煤电有限公司，新疆伊犁哈萨克自治州，835000；

**摘要：**随着工业 4.0 和智能制造的深入发展，数字孪生（DigitalTwin）技术作为连接物理世界与数字世界的桥梁，正在工业领域引发深刻的变革。而锅炉作为能源生产和工业过程中的关键设备，其运行状态直接关系到能源效率、生产安全和环境保护。将数字孪生技术应用于锅炉系统，构建其高保真度的三维可视化模型，对于实现锅炉的智能监控、优化运行、预测性维护和故障诊断具有重大意义。基于此，本文详细探讨面向数字孪生的锅炉三维可视化系统的设计理念、关键技术、系统架构、实现方法。

**关键词：**数字孪生；锅炉；三维可视化；系统设计；工业物联网；智能运维

**DOI：**10.64216/3080-1508.25.09.097

锅炉是指利用各种燃料或其他能源将水加热成规定参数（温度、压力）的热水或蒸汽的设备，在电力、化工、冶金、供暖等行业中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。传统的锅炉运行管理以人工巡检，就地表计和 SCADA（数据采集与监视控制系统）系统为主，存在信息孤岛、监控维度单一、滞后、缺乏数据支持决策等问题，已无法满足现代工业高效、安全、绿色发展等刚性需求<sup>[2]</sup>。数字孪生（DigitalTwin）和三维可视化作为锅炉系统的上述问题提供优化思路。数字孪生将物理实体和数字表示两者之间交互动态、双向、实时的数据，并基于这一过程的仿真、预测和优化，为物理实体整个生命周期的过程管理提供决策支持。三维可视化作为数字孪生系统的界面，通过将对象直接或以模型形象进行直观、沉浸的表现。

## 1 价值分析

### 1.1 实现监控的精确多维化。

二维监控表盘难以清晰地呈现多维度的锅炉物理结构信息和内部流、气（汽）、物（水）场等分布信息。借助三维可视化技术，直观呈现锅炉物理本体、烟道、汽水系统等的空间形态结构，将传感器数据与三维模型绑定，动态呈现重要参数的分布云图（温度云图、压力云图等），实现从宏观到微观的宏观物理场到微观本体参量全方位、高精度实时监控。

### 1.2 实现故障诊断预警

将物理锅炉与数字孪生模型进行仿真运行数据比对分析，可快速发现物理锅炉和数字孪生模型之间的差

异，帮助确认模型中可能的故障点。可视化呈现将诊断结果（异常点/故障部位）以醒目方式突出展示在模型之上，并结合历史数据、专家知识、挖掘分析得到的专家经验，将未来可能出现的故障态势通过三维模型实现虚拟的故障发展过程展现，以支持实施故障预测的运维工作。

### 1.3 促进运行和节能

数字孪生模型可模拟在不同工况下锅炉的运行性能，通过优化算法实现寻找运行最佳参数组合。而三维可视化可呈现优化前、后参数分布差异。例如，在不同运行工况下燃烧效率和热损失的变化等，让工程师直观理解优化方法和效果，确保在实际运行中可以进行合理的调整操作，以达到锅炉运行效率更佳、燃料消耗更优、排放更低的目的。

## 2 系统设计方案

### 2.1 设计框架

锅炉三维可视化基于数字孪生技术<sup>[3]</sup>。实现复杂的三维可视化系统构建，从设计上须符合模块设计、扩展性强、易维护、高交互的原则，其整体构架由物理层、数据层、模型层、应用层、用户层组成，见表 1。其应用核心目标是建立与其对应的物理锅炉系统，在虚拟世界中能够实时同步的数字化镜像，直观展示锅炉的运行状态、内部参数分布以及仿真预报结果，做到对锅炉的科学管控、智能诊断、科学运行和高效管理，进而达到节能降耗、运行安全、维护费用节约的目标。

表 1. 面向数字孪生的锅炉三维可视化系统总体架构

层级	主要组成
物理层	锅炉本体、燃烧器、烟囱、管道、阀门、泵、执行机构、温度/压力/流量/成分传感器等
数据层	数据采集模块(IIoT:OPCUA,Modbus,MQTT)、数据传输网络、数据存储与管理模块(时序 DB,关系 DB,对象存储)、数据处理与清洗模块(去噪,插补,标准化)
模型层	几何模型(BIM/3DCAD)、物理模型(热力学/流体力学/燃烧学,CFD,热平衡模型)、行为模型(操作逻辑,控制策略,故障行为)、规则与知识库、仿真引擎
服务层	数据服务(查询,检索,订阅)、模型服务(初始化,更新,计算,查询)、分析服务(统计,预测,诊断,优化)、可视化服务(转换,渲染)
应用层	三维可视化平台、报警管理、报表生成、移动应用等
用户层	运行人员、维护工程师、管理人员、设计人员等

## 2.2 关键技术

### 2.2.1 三维模型构建融合

三维模型库是数字孪生中面向可视化设计的前提。

锅炉设计阶段的 BIM 或 CAD 高精度模型作为主要数据来源开始,但原始模型往往庞杂,难以达到对交互性能和渲染性能的要求,此时需要对其进行轻量化。建议,以 3DTiles 进行切块传输或使用 Draco 几何压缩算法,去除冗余的几何数据、优化数据拓扑结构。值得注意,锅炉系统较为复杂,大量设备和管道需结合锅炉各设计阶段的模型和来自不同软件系统、不同精度的模型,模型融合后必须保证各部件几何精度一致,各模型的正确拓扑关系不丢失。同时为使模型具有真实的表面材料感和触感效果,需进行贴图的纹理映射和物理材质渲染。对于风机、阀门、燃烧器、排渣系统、料层增厚阀、炉排等动、静关联部位,需定义约束,实现动态反映状态等。最后需搭建统一模型库,此模型库除支持对模型版本化管理外,还需要将三维模型中的模型几何与实际的设备资产标识符、传感器点位进行一一关联,支持数据映射与关联分析。

### 2.2.2 多源异构数据融合映射

如前所述,锅炉运行的数据来自不同位置,数字化后不仅格式、单位等可能存在差别,且数据具有异构性。因此,建议进行数据的格式化处理,即将所有数据转换为数字孪生系统内部统一的数据模型和坐标系。将物理锅炉各物理位置实时获取数据,通过映射到三维模型上的具体几何位置、时刻等,实现物理系统和虚拟世界的映射。

### 2.2.3 物理模型仿真

建立准确真实地反映锅炉物理过程(热传导、传质扩散、流体动力、燃烧化学反应)数学模型,要根据应用需要(稳态效率计算分析、动态响应特性计算分析、燃尽度分析)确定其复杂程度,以达到取舍的最佳效果。实时交互的智能计算应用,其复杂性(精度)和效率要权衡。同时,为让数字孪生锅炉系统能够不仅静态地展

示状态,还能动态地、实时地模拟和预测锅炉内部复杂的物理过程和性能指标,需解决两个主要技术难题:一是将高精度的 CFD 模拟结果(如内部温度、流速分布)准确“画”到三维模型上;二是建立快速的计算模型来实时评估锅炉的效率、能耗和排放,并迅速将结果展示给用户,以满足交互性的要求<sup>[4]</sup>。

### 2.2.4 三维可视化交互

三维可视化与交互是建立锅炉数字孪生系统直观演示及人机交互的关键技术,根据应用需求(Web 端访问、专业桌面应用、VR/AR 应用等)选用不同的图形渲染引擎。如 Three.js/或 Babylon.js(用于 Web 端),Unity 或 UnrealEngine(用于桌面或沉浸式应用等)。针对较为复杂的锅炉模型及大量的运行、动态数据,注重对实时渲染能力的优化设计,常用视点相关的细节层次(LOD)法、视锥体裁剪、遮挡查询等提高实时渲染效率、流畅性。数据可视化表示方式要多样,除直接在模型表面或空间内叠加显示关键参数的实时数值外,还可采用颜色映射、图标指示、动态效果等方式直观展现锅炉设备运行状态(如阀门开度、泵的启停等信息)。对温度场、压力场、速度场等连续分布参数采用着色渲染、流线、粒子系统等进行表达。对历史数据可在模型附近或指定位置绘制趋势曲线图,在交互设计上可支持用户对三维场景进行常规的旋转、缩放、平移、剖切等导航操作、部件选择、属性查询、距离/面积测量等分析功能。还可结合 VR/AR 技术提供沉浸式交互体验,用户可“走进”锅炉内部进行状态检查、虚拟巡检或模拟操作等。

### 2.2.5 系统集成平台化

为确保系统可持续性。系统需提供标准化的应用编程接口(API)等,支持与现有工业信息系统(例如 SCADA、制造执行系统 MES、企业资源规划系统 ERP)接口标准的互操作,实现彼此间数据信息的互联互通,消除信息孤岛,从而实现数据共享和流程协同。另外,从系统架构上建议采用微服务的结构进行模块化的系统架

构设计。例如,将系统中相关功能单元拆分为相互独立,独立部署与扩展的服务单元,提升系统的模块化程度和可维护性。

### 3 系统实现方法步骤

#### 3.1 数据采集与集成平台构建

数字孪生感知层即数据采集和集成平台,主要完成从物理锅炉到数字模型的连接和接口。目的是从物理锅炉的全生命周期获取到各种数据,高效、实时地将这些数据整合为系统所理解的可用信息。具体可依次通过识别全生命周期所需各种数据,如 DCS/SCADA 数据、其他传感器(如温度、压力、流量、液位、烟气成分数据等)、执行器响应、化验结果和仿真数据、基于不同协议(如 OPCUA, Modbus, MQTT, HTTPAPI)等提供支持的各类源,并实现各种网关或适配器来接入并初步转换数据的方式。然后通过数据的清洗及标准化来形成数据的源头接口,并对数据的可行、有效和数据本身参数(单位、坐标系等)进行纠正、填补和标准化的数据清洗流程和标准化数据,以保障数字孪生体对数据质量的需求。后续完成数据的存储,可通过时序数据库(如 InfluxDB)等对运行数据进行存储、关系型数据库对静态或近似静态的数据进行存储,并形成数据服务层,提供标准的 API 给上层应用服务的实时或历史数据请求和数值更新机制,来维护数字孪生体和物理锅炉的实时同步。

#### 3.2 三维模型构建与孪生体创建

可视化关键是三维模型和孪生体建立。可从源头 BIM/CAD 中获取锅炉设计几何信息,对其进行 LOD、3DTiles、Draco 等轻量化后。在满足可视化性能要求的同时保证实时运行。然后进行整合,将来自不同专业平台的模型(锅炉本体、汽水系统、烟风系统、仪表阀门等),几何对齐、拓扑准确、统一到公共坐标系。需采用纹理贴图及物理材质,增强逼真效果,且需要具备阀门、执行机构等可动设备的动画逻辑<sup>[5]</sup>。然后建立模型统一数据库进行管理,采用版本控制方式,且能够将模型几何要素与真实世界物理资产 ID、传感器的点位准确链接在一起。最后产生包含几何外观、物理属性、运行状态等多种要素信息的数字孪生体作为后续数据可视化及计算分析的基础载体。

#### 3.3 核心功能模块开发集成

主要功能模块开发与集成是将系统的逻辑模型(架构)转变为可部署软件的关键环节。需根据架构设计,完成/集成实时监控、故障诊断与预测、运行优化、历史回放与趋势分析、交互与控制等功能模块的开发。其

中,实时监控模块,用于将数据层获取的实时数据与三维场景中的三维孪生体相关联,达到展示参数和指示状态的目的。故障诊断模块,用于比对实时数据与模型中的仿真值并使用规则或算法判断出现故障以及故障的发生位置与故障可能发生的时间,实现故障检测、定位与预测的功能<sup>[6]</sup>。并在三维场景中高亮标识出来。运行优化模块,使用基于模型仿真和优化算法的功能,在三维场景中显示优化过程中的控制量等建议。历史回放模块,用于实现基于三维模型的历史状态的回放、趋势分析等功能。交互模块,用于实现导航、查询、测量等交互功能,同时支持 VR/AR 技术的集成。值得注意,模块化是开发的主要思路,在开发中,要求每个开发模块都有明确的模块接口,要求进行集成测试以保证模块的交互功能和系统集成功能正确且稳定。

### 4 结论

基于数字孪生的锅炉三维可视化系统,是工业 4.0 和智能制造时代提升锅炉运行管理水平的重要技术手段。通过构建与物理锅炉高度映射的数字孪生体、以直观、动态的三维可视化形式表达其运行状态、内部过程及运行性能,可为锅炉智能监控、故障诊断、运行优化及预测性维护提供强有力的技术支撑。展望未来,锅炉数字孪生可视化系统将随着 AI、云边协同、VR/AR 等技术融入,成为未来智慧工厂的重要组成部分。

#### 参考文献

- [1] 宗琛,平怀龙.对工业锅炉安全管理的探究[J].科技与创新,2025,(08):190-192+196.
- [2] 王进峰,张佳祥,王婧,等.虚拟现实技术设计锅炉安全运行数字孪生系统[J].济南大学学报(自然科学版),2025,39(02):286-290.
- [3] 崔健,高山,林旭东,等.基于数字孪生技术的 350MW 超临界热电联产机组协调控制优化研究[J].电子元件与信息技术,2025,9(01):52-54.
- [4] 邱禄全.基于人工智能的火电厂锅炉燃烧系统故障预测与诊断[J].现代制造技术与装备,2024,60(10):131-133.
- [5] 张富玉,杜增辉.工业锅炉数字化设计与数字孪生综述[J].化工管理,2024,(12):89-92.
- [6] 刘俊仁,成月红,张冶,等.300MW 锅炉炉膛三维燃烧温度场可视化技术研究[J].自动化应用,2022,(05):166-169.

作者简介:张帅,1992.6,男,汉,山西省朔州市人,本科,工程师,研究方向:软件工程。