

冶炼工序三维数字孪生可视化技术研究与轻量化改进

杨德宸, 崔景瑞, 郭春宜, 应 科, 刘 晔

(江西铜锐信息技术有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 针对冶金工业冶炼工序高复杂度、高安全要求的生产场景, 提出基于 Unreal Engine 5(UE5)引擎与像素流推送技术的轻量化三维数字孪生系统架构。通过多级模型轻量化处理、分布式像素流多端部署、实时数据驱动模型构建等关键技术, 实现跨平台、低延迟的冶炼工序全流程可视化监控。通过系统集成生产管控、数据驾驶舱、自动巡检及设备拆解功能, 实现硬件成本降低40%以上, 提升生产效率20%以上, 为冶金工业智能化提供可复用的技术路径。

关键词: 数字孪生; 冶炼工序; Unreal Engine 5; 像素流集成; 模型轻量化; 工业数模

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.010

中图分类号: TP273; TF088 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)02-0099-09

冶炼工序是铜、镍等金属生产的核心环节, 其工艺涉及高温熔炼、多相流耦合、耐火材料侵蚀等复杂物理化学过程, 具有设备结构紧凑、运行参数强关联、监测维度多元、流程离散等特点^[1-2]。传统二维SCADA、DCS系统依赖仪表盘、趋势图等平面化展示, 难以直观呈现设备空间布局与故障空间位置路线, 故障定位效率低、误检率高^[3-4]。此外, 炉内极端环境也使得实时监测与工艺优化面临严峻挑战。因此, 建设以自动化、数字化、智能化为核心特征的智能工厂是当前及未来发展方向^[5-6]。

数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟镜像, 为冶炼过程提供了实时监控、故障预测与工艺优化的有效途径^[7]。在理论体系构建方面: Glaessgen等^[8]在NASA技术报告中首次提出数字孪生“虚实数据双向流动”的核心概念; 王雪松等^[9]指出数字孪生技术在优化生产流程和过程控制中的重要作用, 强调其在工业4.0中的发展地位; 曹剑等^[10]通过实时数据及三维互动解决方案实现了低成本的冶炼智能化系统。在技术瓶颈突破方面: 葛秀欣等^[11]提出数据底座驱动模型建设与智能决策, 从而实现对工艺及数据的全面监测优化; Miller等^[12]通过增强计算机辅助设计模型与空间相关的非几何数据来提高模型的互连性。在工艺优化方面: 数字孪生通过感知物理空间数据、建立几何关联等方式, 将真实冶炼

流程与设备映射至虚拟空间, 实现对生产过程的数字化精准复刻与动态控制^[13]。该技术使传统“黑箱”式的冶炼过程变得透明、可控^[14]。在此基础上, 面向实际生产流程与物理行为的虚拟仿真, 能够以更灵活、更便捷的方式支持工艺验证与运行推演^[15]。

在数字孪生应用领域, 现有方案仍面临多重局限。在架构与传输层面: three.js开发的三维可视化系统受网页端限制, 无法加载面数达百万级别模型, 且依赖本地硬件渲染, 帧率通常在20 fps以下^[16]; 陈宇等^[17]使用传统OPC-DA技术从DCS系统获取数据, 但无法跨平台运行且网络穿透能力较差。在模型轻量化层面: 房峰等^[18]采用隐藏剔除与平滑规整替代方式将模型点面降低, 该方法属于建模软件的离线轻量化策略, 无法根据场景变化动态调整, 也未对纹理渲染进行优化。李波等^[19]通过网格合并与模型压缩等方式, 将网格数量降低60%, 但基于WebGL的渲染技术仍存在加载时间长、硬件渲染使用率低等问题, 并且未将模型与数据及业务相融合, 从而限制了其应用价值的进一步扩展。

针对以上痛点, 本研究通过构建“UE5引擎+像素流服务+Vue前端”三层架构系统, 实现了以下功能: 高保真三维场景的低延迟传输与跨平台交互; 通过分布式像素流结合Vue响应式系统, 克服了传统WebGL渲染性能瓶颈与RTSP流高延迟问题; 以

收稿日期: 2025-09-08; 修订日期: 2025-12-23

基金项目: 江西铜锐信息技术有限公司科研项目(RD20240401)资助

作者简介: 杨德宸(1996—), 男, 河北石家庄人, 硕士, 工程师, 研究方向: 数字孪生智能化, E-mail: yang.de@foxmail.com; 通信作者:

刘晔, 高级工程师, E-mail: 100481000@qq.com

多层次动态模型轻量化策略，在保留模型关键几何特征的前提下，显著降低了模型面数与运行消耗，提升了系统流畅性并降低了硬件要求；实现了全要素可视化，并可通过整合生产管控、自动巡检、POI (point of interest)定位、设备拆解等业务模块，构建“物理实体—虚拟模型—生产管控”闭环。

1 整体技术架构

本系统的整体技术架构包含孪生数模层、引擎

层、业务应用层(图 1)。

以孪生数模层为基础，整合不同 OT(operational technology) 数据及三维模型数据、设备数据等，通过 OPC-UA 协议转换实现 OT 层数据到 IT(information technology) 系统的实时转发，并利用 datasmith 与程序化建模工具将相关三维设备模型导入，一同供引擎层使用。引擎层通过各关键技术模块以功能组件化形式进行开发，将数模映射在业务应用层，为现场生产管控提供相应业务功能。

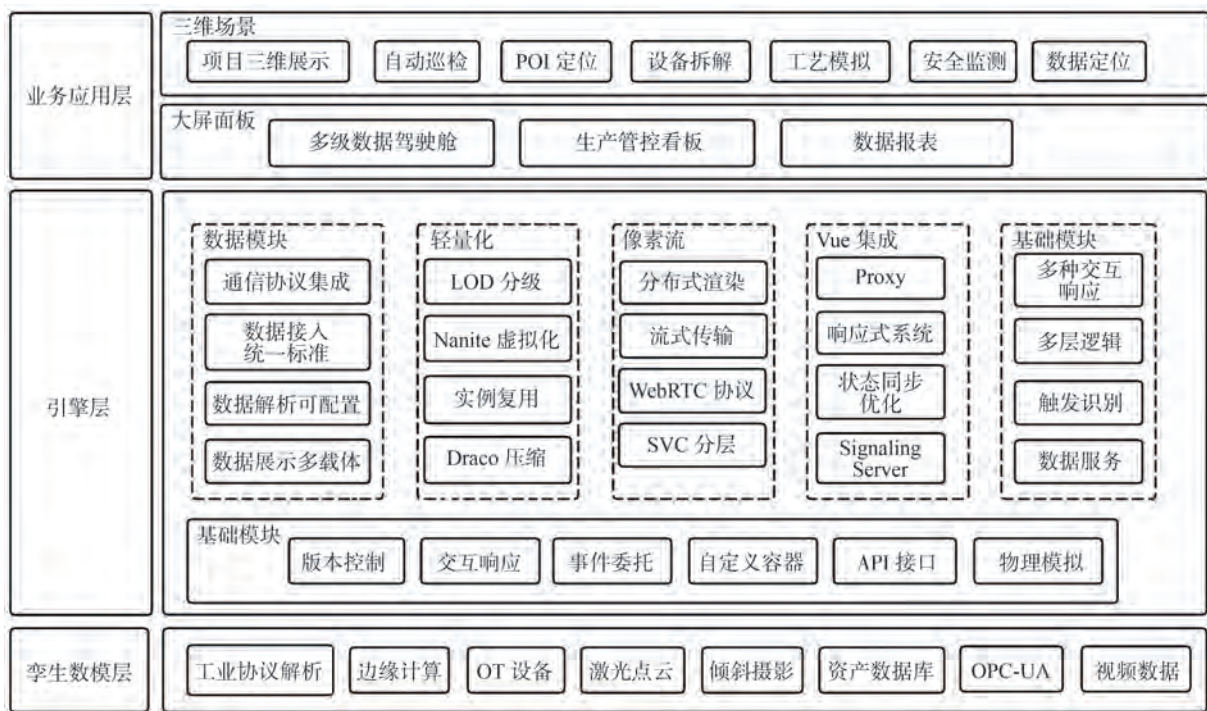


图 1 系统整体架构图
Fig. 1 Overall system architecture diagram

1.1 孪生数模层

孪生数模层作为系统的基础输入，主要分为数据类和模型类。

数据类通过部署边缘网关采集不同设备及传感器的实时数据，通过 OPC-UA 进行协议转换后作为输入，供引擎层实时使用。

模型类主要分为地形、场景、设备 3 类模型。可通过 Datasmith 插件高精度转换和导入，将倾斜摄影 OSGB 类文件转为高精度三维地形。同时，可针对高精度三维模型，将其层级关系解析为树状结构，导入已解析为点、面和材质等信息的网格数据。

1.2 引擎层

引擎层包含基础模块、数据模块、轻量化模块或像素流、Vue 集成等关键模块。

基础模块。包含引擎底层代码及功能模块，UE 端整体采用事件委托进行双向通信，保证各类事件响应的及时性及准确性。同时提供自定义容器，供用户填充所需数据报表及网页等内容。系统内外均提供 API 接口，以完成各类数据交换及用户响应。

数据模块。负责接收底层数模数据，集成 MQTT, Websocket, https 多种工业实时通信协议并开放相应接口，提供数据解析服务，保证数据传输可靠性，通过实时数据绑定管线，支持在多载体供

用户查看。

轻量化模块。采取模型多级轻量化处理链,覆盖模型实时加载(LOD分级)-模型渲染(Nanite虚拟化)-模型应用(实例化复用)整套流程,从各个方面进行轻量化处理,提高运行效率及资源利用率。

像素流。基于WebRTC(web real-time communication)协议推流,降低硬件要求的同时保证了画面质量,结合SVC(Scalable Video Coding,可分层视频编码)实现基础层+增强层的分离传输,确保弱网环境下基础交互可用。

Vue集成:采用信令服务器与UE实例安全对接的同时利用Proxy劫持用户操作事件,实现前后端逻辑及操作交互分离,优化状态同步逻辑,仅传输变化属性,减少带宽占用。

1.3 业务应用层

业务应用层主要包含三维场景及数据驾驶舱业务。具体功能包括:针对工序工艺内重要数据内容进行POI一键跳转及展开,根据巡检路线设计自动巡检及数据展示,对于关键设备的高精度模型,提供设备分级拆解及培训、工艺产线模拟功能等。多级数据驾驶舱对厂区、车间、班组、设备进行多级数据一览及详情展示,关键内容自动生成报表供现场人员使用。

2 关键技术

2.1 OT数据采集与多源数模驱动技术

OT数据采集与多源数模驱动技术包含工业协议解析、多源数模驱动、前端数据面板应用驱动,可打通OPC UA→MQTT/WebSocket/HTTPS→UE蓝图/数据驾驶舱的三级通道,突破传统SCADA系统与三维引擎数据壁垒。

2.1.1 工业协议解析

工业协议解析采用分层解耦架构实现多协议兼容,通过在设备接入层、协议转换层、边缘计算层等各层之间的标准化接口通信,确保系统的可扩展性及协议无关性。设备接入层支持多种协议,包括低速设备协议(Modbus RTU)、实时控制网络协议(Profinet IO)以及开放架构协议OPC UA(支持信息模型嵌套)。协议转换层采用嵌入式网关内置的统一数据模型来定义标准化数据结构。边缘计算层的

运行过程:先进行数据标准化处理,即进行数据清洗,剔除无效值,并以FFT频域分析或滑动平均滤波进行特征提取,此时数据的压缩量达90%;然后将标准化数据以JSON格式化进行数据简易化处理;再将简易处理后的数据经由MQTT/Websocket等通信协议传输至系统引擎层。

2.1.2 多源数模驱动

多源数模驱动可构建多层数据融合管线。该系统使用Data Broker接收统一数据,在UE中构建数模驱动子系统,将不同类型实时数据及业务信息使用数据解析器分发至驱动模块。其中,材质驱动根据实时数据变化改变模型表面纹理;动画驱动根据实时数据变化控制模型移动及场景变化,达到工艺同步、产线仿真等效果;物理仿真根据实时数据变化模拟现实场景物理事件,达到反馈模拟及控制效果。同时,能以工艺数据、监测数据、设备数据、业务数据驱动三维模型数据及物理模拟数据,实现多源数据的统一流式转换,以及三维全要素与冶炼工序现场动态同步的全方位、多场景的监测及生产管控。

2.1.3 前端数据面板应用驱动

前端数据面板应用驱动可将Vue-UE数据双向绑定,通过Proxy代理监听数据变化,将三维场景数据更直观地以数据面板形式展现。同时,可采用定向射线检测设计屏幕坐标向世界坐标转换算法,实现点击穿透定位,达到点击图标至三维场景聚焦联动。

2.2 模型轻量化技术

模型轻量化技术包含实时屏比LOD分级、Nanite虚拟几何体、实例化复用、纹理压缩及材质优化。

2.2.1 实时屏比LOD分级

实时屏比LOD分级时,以最高精度LOD0为基准,采用4级LOD分级。LOD1~LOD3分别将点、面精度降低25%,50%,75%,采用3次样条插值的方式对中间数据进行插值,得到屏幕像素占比与模型精度及纹理流送贴图分辨率的绑定序列,并将其作为映射参数传递到三维模型。

另外,实时屏比LOD分级还包括,通过计算模型原始大小下的轮廓构建球体边界。在系统运行时,获取当前视口的屏幕空间尺寸。在世界空间中计算模型到视角相机的距离。根据投影矩阵缩放因子,获取屏幕空间的缩放比例。将球体边界在屏幕空间

中的直径与屏幕视口高/宽的比值作为当前模型屏幕像素占比进行序列映射，得到LOD最佳分级。

2.2.2 Nanite虚拟几何体

与传统渲染以三角面片为基本单元不同，Nanite是将模型离散化为2~8像素大小的微多边形集群，包含中心坐标、材质索引、虚拟纹理坐标、细节层次等，从而实现按需渲染。

在Nanite虚拟几何体构建过程中，需在离线处理阶段对相邻或重叠模型自动生成体积域并放置在其周围，范围略大于希望包含的模型。后经图2所示逻辑构建HLOD(hierarchical level of detail)代理模型，生成虚拟纹理。



图2 HLOD代理模型生成逻辑
Fig. 2 Generation logic of HLOD proxy model

另外，在系统运行时，需设置模型所需边界半径，计算体积域填充范围，生成相应的HLOD代理模型。同时，通过Compute Shader进行视锥剔除、遮挡剔除、背面剔除，仅加载视野内集群对应的纹理，以深度优化网格体渲染管线，达到渲染效率最大化。

2.2.3 实例化复用

要实现实例化复用，先要构建实例模型。模型部件的几何特征向量定义为：

$$F=\left[V/A,\kappa_{\max },I_{xx}/I_{yy},S_{\text {compact }}\right]^T \quad \text { 式(1)}$$

式中： V/A 为体积表面比，衡量结构紧凑度； $\kappa_{\max }$ 为最大曲率，用以表征几何复杂度； I_{xx}/I_{yy} 为惯性矩比率，用以描述各向异性； $S_{\text {compact }}$ 为紧凑度分数。

采用马氏距离消除量纲影响：

$$D\left(F_i, F_j\right)=\sqrt{\left(F_i-F_j\right)^T \sum^{-1}\left(F_i-F_j\right)} \quad \text { 式(2)}$$

当 D 小于0.05阈值时判断为相似部件。

每个实例的位置姿态可由变换矩阵得到：

$$\boldsymbol{M}_i=\boldsymbol{T}_i \boldsymbol{R}_i \boldsymbol{S}_i \quad \text { 式(3)}$$

式中： $\boldsymbol{T}_i$ 为实例位移矩阵； $\boldsymbol{R}_i$ 为实例自身旋转矩阵； $\boldsymbol{S}_i$ 为共享基础缩放矩阵。

此时，对于场景中的相似部件，只需在一次绘制调用后采用变化矩阵即可实现实例化复用。

2.2.4 纹理压缩及材质优化

使用UE5的Basis Universal纹理压缩格式，将漫反射、法线、粗糙度等纹理压缩至BC7/BC5格式，文件体积压缩比可达8:1。采用材质实例化技术，共享同类设备的基础材质，并通过参数调整区分表面属性，可减少材质编译耗时与显存占用。

2.3 UE像素流与Vue混合架构技术

UE像素流与Vue混合架构技术包含像素流底层传输、组件通信。

2.3.1 像素流底层传输机制

系统像素流送整体架构如图3所示。采用WebRTC QoE动态调整算法，基于网络状态动态切换编码档位，当丢包率大于0.1或RTT大于200时，采用H.264进行流送，比特率为2Mbps，流送清晰度为720p；此外，采用AV1进行流送，比特率设定为8Mbps，流送清晰度为2K；同时，结合SVC(可分层视频编码)，可实现基础层+增强层的分离传输，确保弱网环境下基础交互可用。另外，可通过TURN(traversal using relays around NAT)中继服务器解



图3 系统像素流送架构
Fig. 3 System pixel streaming architecture

决NAT穿透问题,保障跨公网通信。还可采用分布式架构通过服务器经由分发服务器分配Signaling Server地址及端口,进行多用户端推流。

2.3.2 组件通信机制

该机制的指令传输协议:通过Vue的响应式系统,基于数据劫持机制通过Proxy监听用户交互事件。当触发用户操作时,生成结构化JSON指令,发送至信令服务器,UE端通过指令路由解析器解析不同API指令,以事件分发方式映射至三维场景及模型对象,并利用状态差分同步算法仅回传变化属性,降低带宽消耗。

3 系统应用

3.1 三维场景及数据驾驶舱联动

如图4所示,系统可基于Vue的ECharts组件,开发实时趋势图,进行问询式响应,实时更新数据至前端,从而实现三维场景及数据驾驶舱联动。三维场景可提供多种漫游及视角切换,配合区域POI实现感兴趣区域快速跳转。

管理人员能够依靠三维场景及数据驾驶舱联动,根据生产节奏时序图把控生产进度[炉内流量曲线、仪表盘(压力流量)等],同时将实时数据与现场同步,优化产线节拍,提高运维效率20%以上。

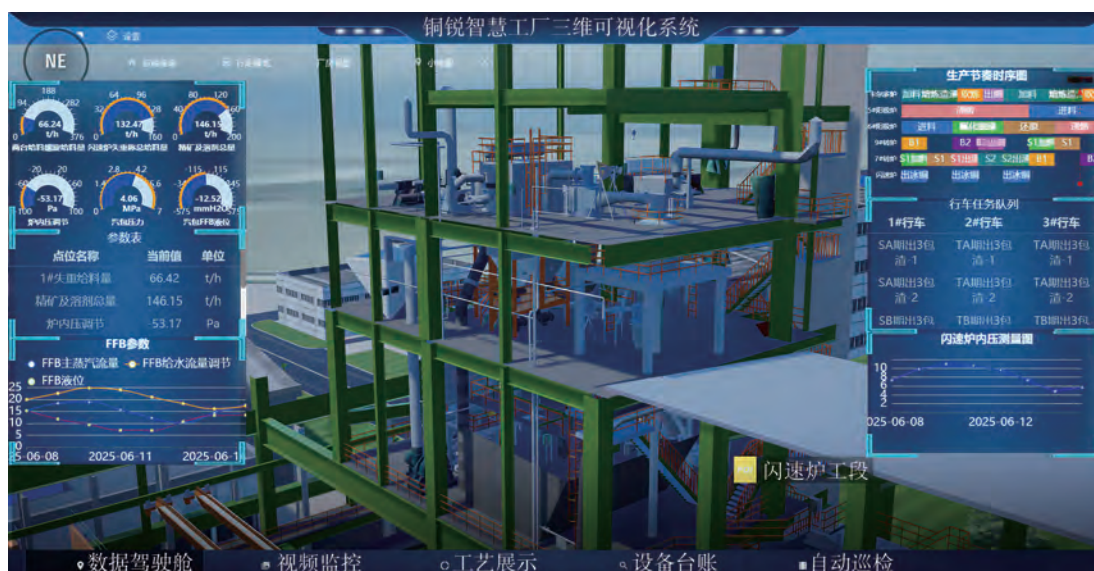


图4 三维数据驾驶舱

Fig. 4 3D data cockpit

3.2 生产数据管控

如图5所示,系统可针对区域-班组-设备-指标分别设定不同级别的POI点,层层递进进行实时数据展示,搭配数据报表使数据利用最大化,从而实现生产数据管控。

场景指标可实时显示更新,同时可在右侧进行设备指标总览,方便快速查询,减少故障定位时间。

3.3 自动巡检

如图6所示,系统可在UE5中使用动画序列制作三维路径动画,结合传感器阈值触发事件委托,控制视角在指定动画路径上自动巡航,同时关键设备及指标数据始终面向用户展示,从而实现自动巡

检。只需在系统中漫游巡检,即可监测各个设备关键指标运行情况,当指标异常告警时可迅速响应。自动巡检可减少50%人工巡检频次,同时大幅减少2h及以上故障停机时间。

3.4 模型拆解

如图7所示,系统可提供多种拆分粒度及范围设定,支持一键式自动拆分或鼠标拖曳拆解,辅助操作人员理解设备内部构造。

通过UE5的静态网格拆分技术,可将冶炼设备本体拆解为外壳、内衬、运行系统等可交互部件。同时,左侧展示设备详细信息,可供现场人员及时记录及联系相应处理人员。另外,该系统可减少30%现场培训成本。

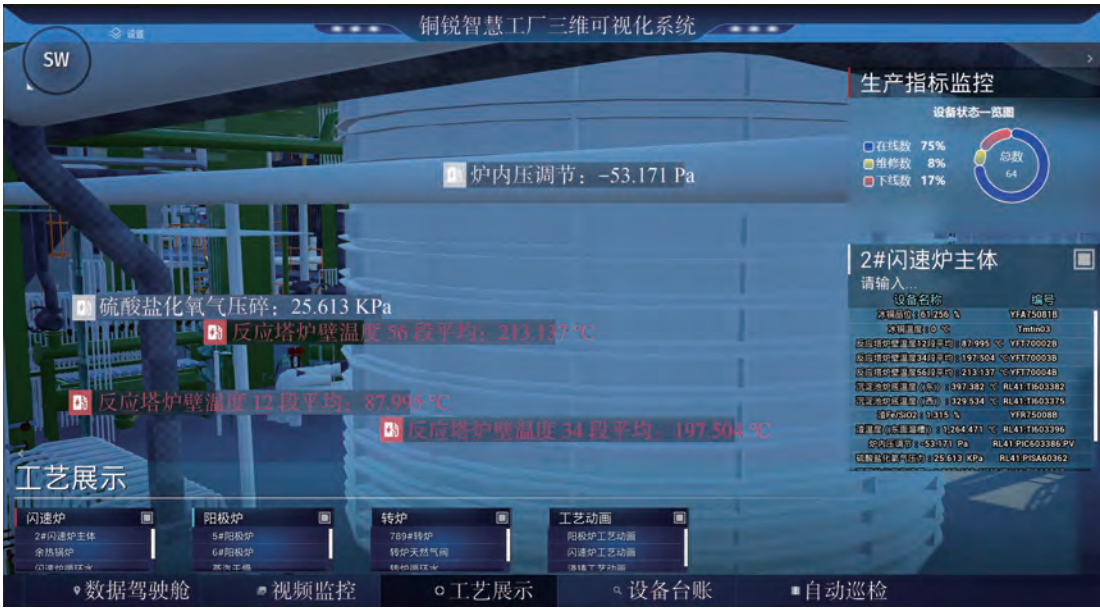


图5 生产数据管控
Fig. 5 Production data control



图6 自动巡检
Fig. 6 Automatic inspection

3.5 模型轻量化

系统开发了模型批量轻量化工具，支持一键轻量化操作。模型轻量化后，数字孪生系统在内存占用、模型面数展现、实时性能方面均有效果较好的优化。其中模型面数的减少是根本，能直接影响到绘制和渲染性能。在渲染方面由于采用了Nanite虚拟化，所以提升更为明显。轻量化前后性能提升效果对比见图8及表1。可见，与轻量化前相比，轻量

化后，系统在绘制调用、GPU内存占用、渲染线程时间等各方面性能均有显著提升。

在绘制调用方面：场景绘制三角形数量平均值降至2144101.75个，较轻量化前减少33.8%；绘制基本图元调用次数平均值降至5582.83次，减少7.5%。同时，绘制机制得以进一步优化，负载更加均衡，模型绘制效率显著提升。

在GPU内存占用方面：冶炼场景2D纹理内存由

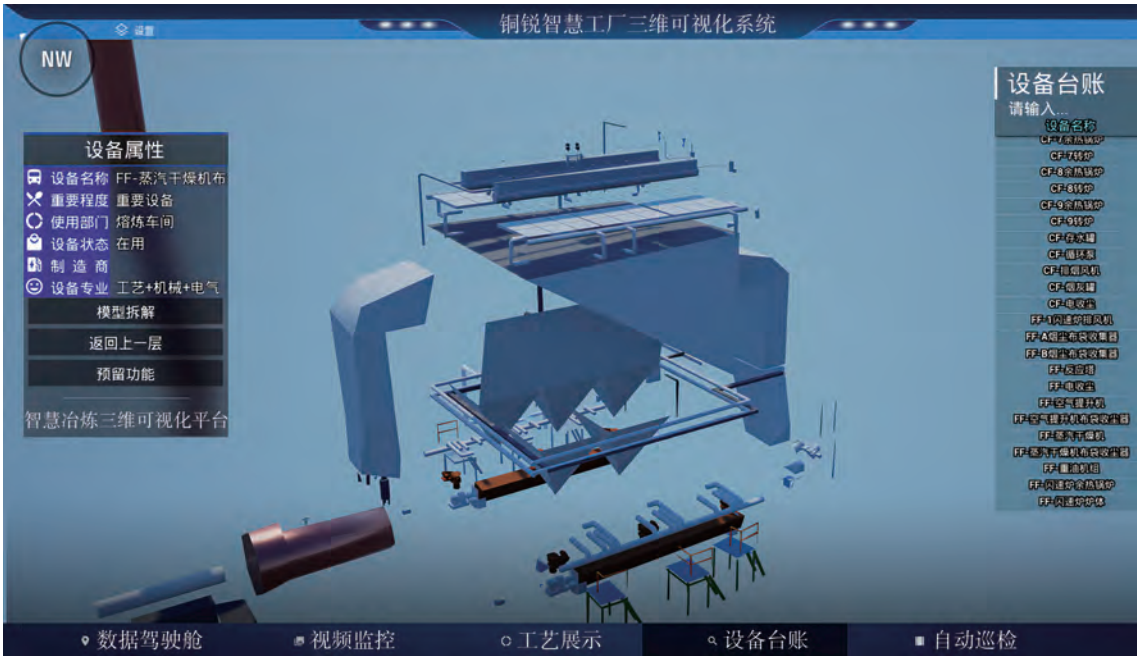


图7 设备拆解

Fig. 7 Device disassembly



图8 模型轻量化前后对比效果

Fig. 8 Comparison of the model before and after lightweighting

轻量化前的998.26 MB降至708.08 MB，减少29%；顶点缓冲内存由326.6 MB降至154.6 MB，减少52.6%；索引缓冲内存由133.82 MB降至70.32 MB，减少47.4%。内存的大幅减少，降低了GPU存储压力，避免了低配置设备因显存不足导致的模型加载失败问题，降低了硬件成本。

在渲染线程时间方面：冶炼场景渲染时间由4.87 ms降至2.08 ms，减少57.2%；GPU渲染时间由45.73 ms降至37.25 ms，减少18.5%；帧时间由46.03 ms降至37.26 ms，减少19.1%，画面帧率提升至25~30 fps，满足实时交互需求，且远处模型因LOD分级优化，视觉效果无明显差异。

表 1 模型轻量化前后对比效果汇总

Table 1 A summary of comparison of the model before and after lightweighting

指标	轻量化前		轻量化后	
	除外立面	闪速炉	除外立面	闪速炉
Render target memory 2D/MB	639.38	647.12	623.44	557.62
Texture memory 2D/MB	998.26	1013.07	708.08	705.99
Vertex buffer memory/MB	326.60	326.67	154.66	154.80
Texture memory 3D/MB	2.26	2.26	2.26	2.26
Render target memory 3D/MB	17.56	17.56	17.56	17.56
DrawPrimitive calls/次	6211	6035	6135	5582
Frame Sync Time/ms	13.46	16.55	7.32	12.72
StatUnit RenderThreadTime/ms	4.87	6.23	2.08	2.61
StatUnit GPUTime/ms	45.73	48.84	37.25	44.53
StatUnit FrameTime/ms	46.03	49.12	37.26	44.76

4 结 论

本研究面向冶炼工序“高温高危、多参数强关联、传统监测低效”的核心痛点，构建了基于UE5、像素流与Vue的三维数字孪生系统，取得以下成果：

- 1) 以OT数模结合实际生产需求，使用数字孪生技术对生产管控、数据监测、数据应用、虚拟巡检等方面进行了闭环构建。
- 2) 针对现有数字孪生技术在冶炼场景的应用瓶颈，提出了多级轻量化链技术创新。
- 3) 实现了200 ms 内的低延迟访问及实时更新，提高了故障响应及排查速度，可减少故障停机时间2 h。
- 4) 人工巡检频次减少50%，配合业务工艺一览表间接提高生产效率20%。
- 5) 硬件资源需求降低40%以上，同时在便携笔记本上的运行帧率达25~30 fps，较传统系统提升30%以上。

参考文献：

[1] 官智超,周灿,邹舟,等.中国铜冶炼行业数字化转型挑战与关键技术[J].铜业工程,2025(4): 1-10.

[2] 林成东,周天驰,张沅,等.铜冶炼厂三维数字孪生虚拟工厂平台研究与应用[J].冶金自动化,2021,45(4): 12-19.

[3] 余冰.铜冶炼余热锅炉控制系统[J].有色冶金设计与研究,2019,40(6): 54-57.

[4] 胡状云.顶吹炉烧嘴先进控制系统的设计与实践[J].工业控制计算机,2023,36(1): 25-27.

[5] ZHOU J, CHEN Z, ZHOU P, et al. Numerical simulation of flow characteristics in settler of flash furnace [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1517-1525.

[6] 刘海泉.铜冶炼智能工厂应用系统建设思路与方案[J].铜业工程,2018(6): 65-69.

[7] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing [J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.

[8] GLAESSGEN E H, STARGEL D W. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force systems [R]. NASA/TM-2012-216813, 2012.

[9] 王雪松,王林,程子怡,等.炼钢智能化技术的研究与发展[J].冶金自动化,2025,49(3): 67-88.

[10] 曹剑,董兵斌,何俊平,等.基于Unity3D的矿热炉全自动配料系统可视化设计研究与应用[J].铁合金,2024,55(5): 47-50.

[11] 葛秀欣,朱志斌.钢铁行业数字孪生工厂平台的研究与应用[J].冶金自动化,2021,45(6): 37-45.

[12] MILLER A M, ALVAREZ R, HARTMAN N. Towards an extended model-based definition for the digital twin [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2018, 15(6): 880-891.

[13] 王峻峰,张玉帆,邵瑶琪,等.面向生产性能数字孪生的仿真数据映射研究[J].系统仿真学报,2021,33(10): 2470-2477.

[14] 罗瑞平,盛步云,黄宇哲,等.基于数字孪生的生产系统仿真软件关键技术与发展趋势[J].计算机集成制造系统,2023,29(6): 1965-1982.

[15] 魏一雄,郭磊,陈亮希,等.基于实时数据驱动的数字

- 字孪生车间研究及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 352-363.
- [16] 张高义, 徐杨, 曹斌, 等. 基于数字孪生的铝电解槽三维可视化监控系统[J]. 计算机与现代化, 2024(5): 104-109, 114.
- [17] 陈宇, 邱玮杰, 蒋梦轩, 等. 基于数字孪生的焙烧过程状态实时监控系統研发[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(2): 8-16.
- [18] 房峰, 袁逸萍, 王波, 等. 基于Unity3D的纺机制造车间数字孪生系统开发与实现[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(8): 143-144.
- [19] 李波, 胡成军, 刘宾, 等. 煤矿复杂装备数字孪生几何模型轻量化方法[J]. 煤炭工程, 2025, 57(8): 218-224.

Application of 3D Digital Twin Visualization Technology and Model Lightweighting in Smelting Process

YANG Dechen, CUI Jingrui, GUO Chunyi, YING Ke, LIU Ye

(Jiangxi Tongrui Information Technology Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: Considering high complexity and high safety requirements in the smelting section of metallurgical industry, a lightweight 3D digital twin system architecture based on Unreal Engine 5 (UE5) engine and pixel stream push technology was proposed. Cross-platform low-delay visual monitoring of the whole process of smelting section was realized through key technologies such as multi-level model lightweight processing, multi-terminal deployment of distributed pixel stream and real-time data-driven model construction. The system integrated functions of production control, data cockpit, automatic inspection and equipment disassembly, reducing hardware costs by more than 40% and increasing production efficiency by more than 20%. It provided a general technical path for metallurgical industry intelligence.

Key words: digital twin; smelting section; *Unreal Engine 5*; pixel stream integration; lightweight model; industrial digital model

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.010

引文格式: 杨德宸, 崔景瑞, 郭春宜, 应科, 刘晔. 冶炼工序三维数字孪生可视化技术研究与轻量化改进[J]. 铜业工程, 2026(2): 99-107.

YANG Dechen, CUI Jingrui, GUO Chunyi, YING Ke, LIU Ye. Application of 3D digital twin visualization technology and model lightweighting in smelting process[J]. Copper Engineering, 2026(2): 99-107.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxygc