

多平台融合工业园区数字孪生监测技术研究

王卓磊^{1,2,3,4}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室; 3. 煤矿应急避险技术装备工程研究中心; 4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要:针对园区的日常生产、管理及安全防控等方面还处于数字化水平低, 缺乏远程、集控方式的管理手段, 安全风险点监控方式落后等问题, 提出了 1 种多平台融合工业园区数字孪生监测技术。该研究整合 Unity3D, CesiumLab 和 WebGL 技术优势, 采用分层架构搭建系统, 通过多源数据感知、三维建模与动态仿真技术, 实现了园区内外环境的高精度可视化与虚实交互。实现了固定路线巡检与漫游、设备生产系统仿真、生产经营数据分析与预警以及实时天气动态模拟等功能。系统通过 LOD 轻量化、分布式计算及标准化接口优化, 优化了大规模场景渲染与高并发数据处理卡顿的问题。实验表明, 该研究可有效提升园区管理效率, 降低设备故障率, 并支持多终端访问与数据协同。未来将进一步结合边缘计算优化实时性, 扩展设备兼容性, 为智慧园区建设提供更高效率的数字孪生解决方案。

关键词:数字孪生; 多平台融合; 工业园区; Unity3D

中图分类号: TP277

文章编号: 1000-0682(2025)06-0106-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.06.019

Research on multi-platform integrated digital twin monitoring technology for industrial parks

WANG Zhuolei^{1,2,3,4}

(1. China Coal Research Institute; 2. National Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Rock Formation Control; 3. Engineering Research Center for Coal Mine Emergency Avoidance Technology and Equipment; 4. Beijing Coal Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: In response to issues such as the low level of digitalization in daily production, management, and safety prevention in industrial parks, the lack of remote and centralized management methods, and outdated safety risk monitoring approaches, this study proposes a multi-platform integrated digital twin system for industrial park monitoring. The research integrates the technical advantages of Unity3D, CesiumLab, and WebGL, adopting a layered architecture to build the system. Through multi-source data perception, 3D modeling, and dynamic simulation technologies, the system achieves high-precision visualization and virtual-real interaction for both internal and external environments of the park. It implements functions such as fixed-route inspection and roaming, equipment production system simulation, production and operation data analysis with early warning capabilities, and real-time weather simulation. The system optimizes large-scale scene rendering and high-concurrency data processing delays through Level of Detail (LOD) lightweight techniques, distributed computing, and standardized interfaces. Experimental results demonstrate that this research can effectively improve park management efficiency, reduce equipment failure rates, and support multi-terminal access and data collaboration. Future work will focus on integrating edge computing to further optimize real-time performance, expand device compatibility, and provide more efficient digital twin solutions for smart park construction.

Keywords: digital twin; multi-platform integration; industrial park; Unity3D

收稿日期: 2025-05-27

第一作者: 王卓磊(1995—), 男, 山西晋城人, 硕士, 北京交通大学软件工程博士生在读, 工程师, 主要从事智能矿山、矿山机械自动化、智能矿山以及数字孪生研究, 研究基础机械设备全生命周期故障诊断算法优化。E-mail: wangzhuolei@ccrise.cn

0 引言

数字孪生(Digital Twins)概念源于工业制造领域,通过与5G通信、物联网、云计算、大数据以及人工智能等新一代信息技术相结合,实现了数字孪生理论在多个行业领域的实际落地和转化,并逐步延伸到智慧城市、智慧交通和智慧水利等应用领域。数字孪生工业园区应用场景中,将园区所有的人、物、事件、建筑及道路等基础设施,转换为对应的虚拟映像、属性信息及动态变化信息可见,虚实同步运转,可进行安全事故预警和外来发展趋势的预期^[1],模拟仿真决策。而在传统园区的建设中,自动化、数字化、智能化能力建设相对不足,园区内各应用系统建设相互独立,各系统之间数据无法有效共享与融合,信息孤岛现象严重,单系统的智能化建设只能解决单点的问题,无法解决整个园区的问题^[2]。

北京航空航天大学陶飞等提出了数字孪生五维模型,对国内数字孪生技术的研究起到重要指导作用^[3];张南等提出基于数字孪生的车间作业监控及可视化方法,实现了车间生产作业过程的三维虚拟可视化及实时动态交互功能^[4];王成山等提出了1种综合能源系统数字孪生构建关键技术,与先进控制和人工智能等技术结合,实现能源与城市各领域有效互动^[5]。

该文提出了1种基于多平台融合的工业园区数字孪生监测技术,结合Unity3D,CesiumLab和Web-

GL三种平台的优势,分别用于园区模型控制、地面模型加载和生产经营数据展示。具体而言,Unity3D作为强大的3D引擎,负责园区整体场景的构建与交互控制,提供高保真的可视化效果和灵活的用户操作体验;CesiumLab则专注于地理空间数据的处理与加载,实现对园区地面模型的高效渲染与展示^[6];WebGL作为Web端的图形渲染技术,用于将园区的生产经营数据以图表、仪表盘等形式动态展示,支持跨平台访问与实时更新。通过多平台的协同工作,不仅能够实现工业园区的高精度三维可视化,还能将设备运行状态、能耗数据、生产进度等关键信息进行整合与分析,为管理者提供全面的决策支持。

1 架构设计

该研究采用分层架构,结合Unity3D,WebGL和CesiumLab三种平台的优势,实现园区模型控制、地面模型加载和生产经营数据展示的协同工作。技术架构如图1所示,分为数据层、服务层、应用层和展示层,各层之间通过标准化接口进行通信与数据交换,确保系统的高效性、可扩展性和易维护性。数据层主要负责对园区以及厂房内部的数据进行采集、存储与处理;服务层是系统的核心,负责数据的处理、模型的加载和接口服务的提供;应用层是系统的功能实现层,基于3种平台对系统功能进行开发;展示层是系统的用户界面,支持多终端访问与交互。

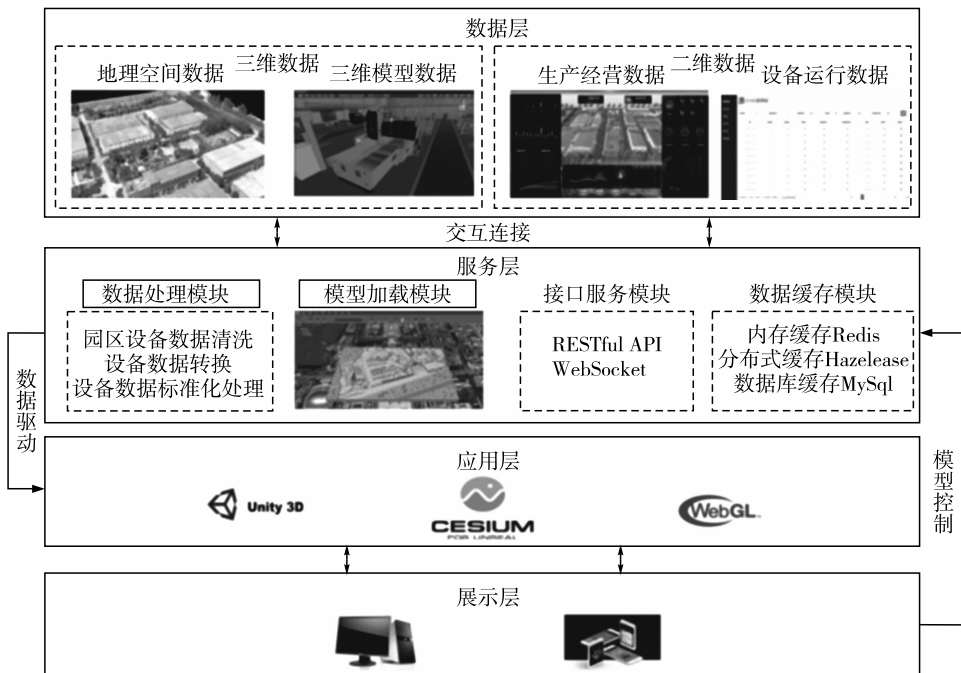


图1 技术架构图

2 关键技术

2.1 园区三维数字孪生场景构建技术

针对上述的技术架构规划,介绍园区三维数字孪生场景搭建方法。针对孪生场景模型构建复杂、范围广及无法精细化的问题,通过无人机倾斜摄影、Unity3D 建模技术以及 3DMax 建模技术相互融合的方法搭建数字孪生场景。基于园区无人机航拍高分辨率的倾斜摄影图像数据,实现园区地形地貌、建筑

结构和设备设施等要素的高精度三维模型构建^[7];利用 Unity3D 建模技术对园区整体场景进行构建与渲染,提供高保真的三维可视化效果;采用 3DMax 建模技术对园区内部设备进行精细化建模,其强大的渲染以及优化功能,可对模型进行材质和贴图处理,增加模型的真实感,降低模型多边形数量,构建精简设备模型^[8]。园区数字孪生场景构建流程如图 2 所示。

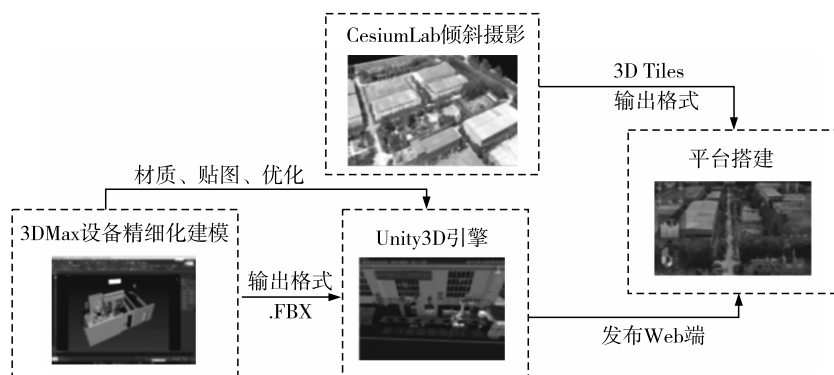


图 2 数字孪生场景构建流程图

2.2 工业园区多源数据感知技术

针对园区设备类型复杂、通信标准多样、数据来源众多从而导致数据采集、管理困难且难以共享的问题。设计了 1 种多源数据感知技术,通过采集园区不同类型数据,对数据进行实时清洗、转换以及标准化,过滤无效、重复或异常数据,将静态数据通过 HTTP 协议转换为对应的 RESful API 接口类型,在

WebGL 中对数据进行处理并渲染至界面中。针对动态数据,包括不同设备自身运行状态、运行相关参数等存储至 MySQL 或者 MongoDB 数据库中,对其动态数据进行高效存储以及管理^[9],调用 Unity3D 平台数据处理工具对数据库数据进行处理并分析,最终在 PC 端或者移动端进行展示中。园区多源数据感知技术流程如图 3 所示。

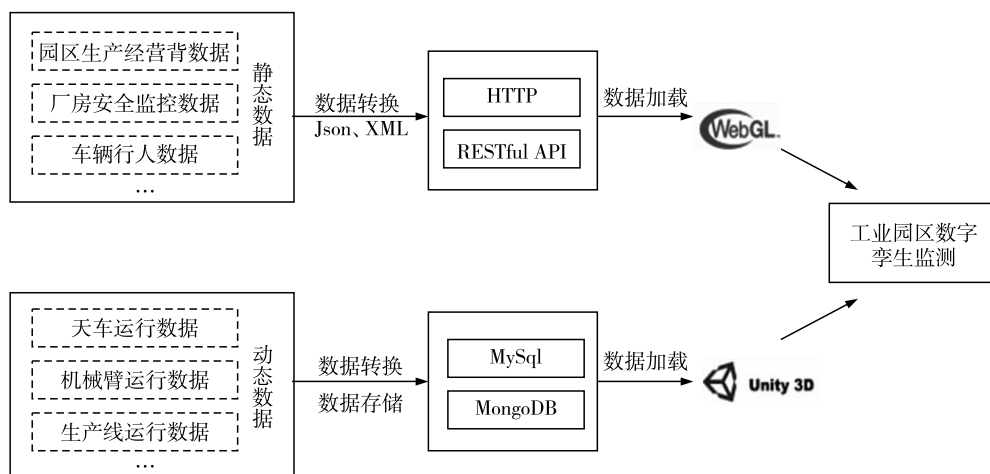


图 3 多源数据感知技术流程图

2.3 基于数据驱动的园区生产系统仿真技术

基于数据驱动的园区生产系统仿真技术是该文重点研究内容,旨在通过三维模型与实时数据的融合驱动,实现对生产过程的虚拟映射与动态仿真。

该技术不仅能够直观展示厂房内部设备布局、生产流程和物料流动,还能通过数据分析优化生产效率、预测潜在问题并支持决策制定。

仿真模型是生产系统仿真的基础,通过几何建

模、行为建模以及物理建模三方面对园区进行建模,几何建模旨在利用 Unity3D 以及 3DMax 专业建模工具构建厂房内部设备、生产线以及物料的三维模型,真实还原生产场景^[10];行为建模通过定义设备、生产线和物料的动态行为规则,通过状态机、脚本或规则引擎实现行为的逻辑控制;物理建模通过调用 Unity3D 的物理引擎,模拟园区内部以及厂房内部设备的运动、碰撞以及力学特性,并对设备故障以及报警等异常情况进行仿真模拟。

数据融合驱动是仿真技术的核心,通过将实时数据与仿真模型结合,实现生产系统的动态映射与交互,通过 HTTP 或者调用数据库接入园区设备的实时运行数据,利用接口服务模块将数据传递至仿真系统;将数据与园区内部如天车、激光切割机、生产线设备等设备的运行状态、生产进度绑定,实现动态更新并模拟三维模型动画;通过时间戳和数据对齐技术,确保仿真系统与真实生产系统的同步。

由于园区设备众多,该文主要介绍某车间内部天车以及激光切割机的生产系统仿真,包括天车起重吊钩移动、天车电机、天车运行轨迹、天车吊绳纵向移动、天车运行速度、激光切割机机械臂旋转移动等,设备运动主要涉及移动以及旋转,需要对各运动部件以及其子物体的 Transform 组件进行处理。通过获取数据库所得数据,通过计算固定系数,转换为 Unity3D 坐标,操作天车移动,天车数据转换系数为 t_1 ,转换为三维坐标公式为:

$$\text{vector3} = (|X_1 t_1|, Y_1, Z_1) \quad (1)$$

其中: X_1, Y_1, Z_1 为天车在 Unity3D 中的三维坐标。

同理,吊钩数据转换系数为 t_2 ,转换为三维坐标公式为:

$$\text{vector3} = (|X_2 t_2|, |Y_2 t_2|, Z_2) \quad (2)$$

其中: X_2, Y_2, Z_2 为吊钩在 Unity3D 中的三维坐标。

图 4 所示为模拟天车运行图,可通过转换相关位置参数实时更新车间天车位置^[11]。

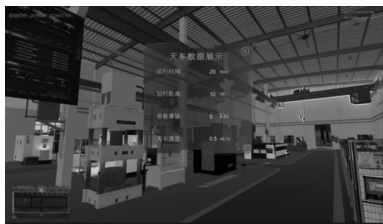


图 4 模拟天车运行

针对激光切割机主要涉及到机械臂的旋转,利

用 Joint 组件来模拟物体之间的连接和约束关系,系统采用了 Hinge Joint 和 Configurable Joint 来实现机械臂的旋转^[12],在底座与大臂之间使用 Hinge Joint,大臂与其他机械臂使用 Configurable Joint,使用逆运动学算法,确保各关节运动协调一致,激光切割机旋转如图 5 所示。

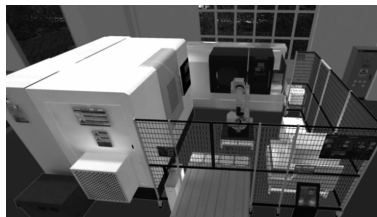


图 5 激光切割机旋转

随着园区设备的不断增加,在系统运行时不同设备同时运行,将会存在模型卡顿,数据驱动不及时等问题,该文对存在的问题进行了优化处理。运用 LOD 技术和模型压缩技术使模型轻量化,确保大规模场景的流畅运行;利用分布计算和缓存技术,提高数据处理以及传输效率;通过标准化接口实现 Unity3D, CesiumLab 和 WebGL 的协同工作、确保仿真系统的一致性。

2.4 安全生产数据分析与预警技术

安全生产数据分析与预警是研究的核心内容之一,旨在通过 WebGL 技术和 HTTP 接口对工业园区的安全生产数据进行实时采集、分析与可视化展示,并结合预警机制辅助管理者优化生产流程、规避潜在风险。数据分析及预警聚焦于设备运行记录、运行天数、产线运行状态等关键数据,通过多维度分析为安全生产提供决策支持。园区生产经营数据通过 HTTP 协议接入园区天车、切割机以及生产线等设备传感器、PLC 控制系统以及数据库中的历史数据,通过获取到设备的启停时间、故障日志、维护记录、设备累计运行时长、联系无故障运行天数、产线的启停状态以及生产效率等^[13],通过 RESTful API 实现数据实时传输,并过滤掉其中的异常值以及缺失值来确保数据完整性。

随后对数据进行处理,包括获取设备的利用率、故障率以及产线 OEE 等,运用时序分析、相关性分析挖掘生产数据规律,借助 WebGL 强大的渲染能力,利用 Three.js 或 Babylon.js 实现 3D 可视化,通过颜色来展示设备负荷分布,超出预设阈值触发预警;实时显示产线启停状态与效率指标;以折线图、柱状图展示运行天数和故障趋势,并基于历史数据训练异常检测模型,来动态识别潜在风险。生产数

据分析以及预警展示如图 6 所示。



图 6 生产数据分析以及预警

3 结语

该文提出了一种多平台融合的工业园区数字孪生监测技术,通过整合 Unity3D、CesiumLab 和 WebGL 等平台,研究了 1 种不仅能够动态展示园区内外部环境及生产经营数据,同时能对园区相关数据进行监测的技术。具体而言,利用 Unity3D 完成了园区内部及厂房内部的精细化建模,并实现了生产系统仿真、固定路线巡检、漫游、天气模拟等动态交互功能;通过 CesiumLab 加载园区地面模型,提供了高精度的地理空间支持;借助 WebGL 技术,将园区的生产经营数据以可视化的方式呈现,为管理者提供了直观的决策依据。提出的多平台、多技术有机融合的方式,为工业园区的数字化转型提供了 1 种可行的技术路径。

然而,在该技术研究过程中,也发现了一些不足之处。首先,园区设备种类繁多且数量庞大,设备接入工作需要逐步推进,同时部分设备的数据存在缺失或不完整的问题,导致数据清理工作复杂且耗时。其次,由于大量设备同时运行会产生较高的计算负载,系统在高并发场景下可能会出现卡顿现象,影响用户体验。这些问题表明,在数据整合效率和性能优化方面仍有较大的提升空间。

未来的工作可以从以下几个方面展开:一是加强数据治理能力,建立统一的数据采集与清洗标准,减少因数据质量问题带来的额外工作量;二是引入边缘计算或云计算技术,通过分布式架构分担系统压力,提高运行效率;三是进一步完善系统的扩展性和兼容性,支持更多类型设备的快速接入,从而提升整体的实用性和适应性。

总之,尽管目前研究仍存在一定局限性,但其初步成果已展现出数字孪生技术在工业园区监测中的巨大潜力。随着技术的不断优化和完善,相信该技

术将在未来的智慧园区建设中发挥更加重要的作用,为工业企业的数字化转型提供强有力的支持。

参考文献:

- [1] 常松. 基于数字孪生的“云上统战”智能化应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45 (12): 173 - 175 + 179.
- [2] 陶刚, 崔艳军, 赵冬然, 等. “双碳”背景下新型智慧园区的建设与应用研究[J]. 电力勘测设计, 2023 (08): 39 - 45.
- [3] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (1): 1 - 18.
- [4] 张南, 张顺, 刘利勋, 等. 基于数字孪生的车间生产过程监控方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (7): 156 - 159.
- [5] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (05): 1597 - 1608.
- [6] 潘俊铨, 徐可, 陈铨, 等. 基于 Cesium 的数字孪生城市平台建设方法研究[C]//中国城市规划学会城市规划新技术应用专业委员会. 智慧规划·AI 赋能——2024 年中国城市规划信息化年会论文集. 广东省城乡规划设计研究院科技集团股份有限公司, 2024: 228 - 236.
- [7] 孟先进, 林寿明, 秦琳, 等. 绿美广东生态建设示范区数字孪生应用研究[J]. 林草资源研究, 2023 (05): 113 - 121.
- [8] 王进峰, 问丛川, 花广如, 等. 基于 Unity3D 的数控机床数字孪生系统设计与实现[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21 (05): 443 - 448.
- [9] 徐健, 刘高峰, 赵一剑, 等. 装配机器人的数字孪生虚实同步及抓取方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36 (09): 2181 - 2192.
- [10] 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 (06): 1965 - 1982.
- [11] 刘怀兰, 赵文杰, 李世壮, 等. 数字孪生车间机器人虚实驱动系统构建方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33 (21): 2623 - 2632.
- [12] 谢曼, 王龙涛, 陈中尹, 等. 实-虚结合的机械臂与数字孪生体协调控制[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45 (11): 243 - 252.
- [13] 胡飞, 侯鹏, 黄宇, 等. “数据+模型”融合驱动的立加数字孪生监控系统应用研究[J/OL]. 机械设计与制造, 1 - 6[2025 - 02 - 12].