

基于数字孪生的智慧工地安全监控系统设计与实现

钟广州

湖北讯翔建设工程有限公司 湖北 恩施 445600

摘要：随着城市化进程加速和建筑行业数字化转型的深入推进，传统工地安全管理模式已难以满足现代大型复杂工程项目对高效率、高精度、高可靠性的安全管理需求。数字孪生（Digital Twin）技术作为连接物理世界与虚拟空间的桥梁，为构建智能化、可视化、可预测的安全监控系统提供了全新路径。本文围绕“基于数字孪生的智慧工地安全监控系统”展开研究，首先分析了当前工地安全管理面临的痛点问题，继而阐述了数字孪生技术的基本原理及其在智慧工地中的适用性；在此基础上，提出了一套融合多源感知、三维建模、实时仿真与智能预警于一体的系统架构，并详细说明了其关键技术模块，包括BIM+IoT数据融合、动态建模引擎、风险识别算法及可视化交互平台。该系统可以显著提升工地安全事件的响应速度与处置效率，降低事故发生率，为建筑行业数字化、智能化升级提供了可行的技术范式。

关键词：数字孪生；智慧工地；安全监控；BIM；物联网；智能预警；三维可视化

引言

近年来，我国建筑业持续高速发展，但安全生产形势依然严峻。传统工地安全监管主要依赖人工巡检、纸质记录和事后追责，存在信息滞后、覆盖不全、主观性强、缺乏前瞻性等固有缺陷。尤其在大型、复杂、多工种交叉作业的施工现场，安全隐患具有高度动态性和隐蔽性，亟需一种能够实现“事前预警、事中干预、事后追溯”的新型安全管理体系。与此同时，以BIM（建筑信息模型）、物联网（IoT）、人工智能（AI）、5G通信等为代表的新兴信息技术迅猛发展，为建筑行业的智能化转型注入了强大动力。其中，数字孪生技术因其具备虚实映射、实时同步、仿真推演等核心能力，成为构建下一代智慧工地的关键使能技术。数字孪生通过在虚拟空间中构建物理工地的高保真镜像，不仅可实现对人员、设备、环境等要素的全景感知与状态还原，还能基于历史数据与物理规则进行风险模拟与决策优化，从而将安全管理从“被动响应”转向“主动预防”。本文旨在探索数字孪生技术在工地安全监控领域的深度应用，设计并实现一套功能完备、技术先进、可落地推广的智慧工地安全监控系统，为提升建筑施工本质安全水平提供理论支撑与实践参考。

1 相关工作与技术基础

1.1 智慧工地研究现状

智慧工地概念自2010年代初提出以来，经历了从“信息化”到“智能化”的演进。早期研究聚焦于视频监控、门禁考勤、扬尘监测等单点系统的集成；近年来，随着BIM与IoT的融合，研究重点转向基于数据驱动

的综合管理平台。例如，基于BIM+GIS的施工进度与安全协同管理系统；利用UWB定位与深度学习实现了高危区域人员入侵检测。然而，现有系统普遍存在“数据孤岛”、缺乏全局视角、无法进行动态推演等问题，难以支撑复杂场景下的智能决策。

1.2 数字孪生技术内涵

数字孪生最早由Grieves教授于2002年提出，其核心在于建立物理实体与其虚拟模型之间的双向数据通道与闭环反馈机制。数字孪生包含五大核心要素：物理实体、虚拟模型、数据连接、服务应用与孪生引擎。在建筑领域，数字孪生可理解为：以BIM模型为基础框架，融合实时传感器数据、施工进度信息、环境参数等多源异构数据，在虚拟空间中构建一个与物理工地同步演化的“数字副本”，并通过仿真、分析、优化等手段支持各类业务应用。

1.3 数字孪生在工地安全中的适用性

数字孪生技术在工地安全监控中具有天然优势。它能够将人员、机械、材料、环境等安全相关要素统一纳入虚拟模型，实现全要素映射；通过IoT设备持续采集现场数据，实现毫秒级状态更新，保障实时状态感知；同时，抽象的安全隐患可被转化为直观的三维可视化告警，极大提升风险可视化能力。更重要的是，数字孪生具备仿真推演能力，可模拟不同施工方案下的安全风险，辅助制定最优策略；并通过“监测—预警—处置—评估”的闭环反馈机制，支撑全流程安全管理。因此，构建基于数字孪生的智慧工地安全监控系统具有重要的理论价值与现实意义。

2 系统总体架构设计

本文提出的系统采用“云-边-端”三层架构，整体设计兼顾实时性、可扩展性与安全性。

2.1 感知层（端）

感知层作为系统的信息源头，承担着对物理工地全方位数据采集的任务。该层部署了多种类型的传感与识别设备，包括用于人员精确定位的UWB或蓝牙AoA基站、用于监测塔吊、升降机等大型机械设备运行状态的振动、倾角与载荷传感器、用于环境安全评估的温湿度、PM2.5、噪声及风速传感器，以及配备AI算法的高清视频监控摄像头，用以识别未佩戴安全帽、闯入禁区等违规行为^[1]。此外，BIM模型作为静态空间基准，为所有动态数据提供几何与语义参照。上述设备通过5G、LoRa或WiFi 6等高速低延时通信协议，将采集的数据汇聚至边缘网关，为上层处理提供原始输入。

2.2 边缘计算层（边）

边缘计算层位于感知层与云平台之间，主要部署轻量级数据处理单元，负责对原始数据进行初步清洗、滤波与格式标准化，以降低无效数据传输对网络带宽的占用。同时，该层具备本地实时分析能力，例如通过空间聚类算法检测人员异常聚集、基于阈值判断设备运行是否偏离正常范围等，从而在第一时间触发本地告警，保障关键安全事件的低延迟响应。此外，边缘节点还支持断网续传机制，在网络中断期间缓存数据，待恢复后自动补传，确保数据完整性与系统鲁棒性。

2.3 平台层（云）

平台层是整个系统的核心中枢，集成了数字孪生引擎、数据融合中心、智能分析模块、可视化交互平台与应急指挥系统等多个功能子系统。其中，数字孪生引擎负责加载并动态更新BIM模型，结合物理规则进行仿真推演；数据融合中心则整合来自BIM、IoT、视频流、施工进度计划等多源异构数据，构建统一的时空数据底座，为上层应用提供一致的数据视图；智能分析模块依托规则引擎与机器学习模型，实现对潜在风险的自动识别与分级预警；可视化交互平台通过Web端与移动端向管理人员提供沉浸式的三维工地视图；应急指挥系统则联动广播、短信、APP推送等多种渠道，在风险发生时快速启动响应流程^[2]。各子系统采用微服务架构进行解耦，支持按需弹性扩展与灵活配置，有效提升了系统的可维护性与适应性。

3 关键技术实现

3.1 BIM与IoT数据融合

BIM模型与IoT数据的有效融合是构建高保真数字孪

生体的基础。BIM提供静态的空间结构与构件语义信息，而IoT则注入动态的实时状态数据，二者互补形成完整的工地数字画像。为实现这一融合，系统采用“坐标对齐+属性绑定”的策略：首先，利用BIM模型中每个构件的唯一标识符（如IfcGUID）作为数据锚点；其次，通过空间位置匹配算法，将部署在现场的IoT设备（如塔吊上的倾角传感器）精准关联到BIM中对应的物理对象；最后，构建基于PostgreSQL、PostGIS与TimescaleDB的时空数据库，支持高效的时间序列查询与空间关系计算。例如，当塔吊传感器上报倾角异常时，系统不仅能立即在三维模型中高亮对应构件，还能自动调取其历史运行数据进行趋势分析，辅助判断故障类型。

3.2 动态建模与实时渲染引擎

为实现高保真且流畅的虚拟工地呈现，系统前端采用WebGL与Three.js构建轻量级三维渲染引擎，后端则利用Unity或Unreal Engine处理复杂的物理仿真任务（如基坑坍塌、脚手架失稳等）。在渲染优化方面，系统引入LOD（Level of Detail）技术，根据用户视角距离动态调整模型细节层级，在保证视觉效果的同时显著降低GPU负载；对于大量重复对象（如钢筋、模板单元），采用实例化渲染技术批量绘制，大幅提升帧率。更重要的是，系统通过WebSocket建立与边缘层的长连接，实时接收状态更新数据，并驱动模型属性（如颜色、位置、旋转、动画）的动态变化，确保虚拟工地与物理现场始终保持同步。

3.3 安全风险智能识别算法

系统在风险识别方面融合了规则驱动与数据驱动两种范式。一方面，基于行业安全规范与专家经验，构建了结构化的安全规则库，涵盖“人员进入基坑未佩戴安全绳”“塔吊作业半径内存在人员”等典型场景，并通过射线检测、包围盒碰撞等几何计算方法实时判断违规行为；另一方面，针对设备健康监测与异常行为识别等复杂任务，系统引入了多种机器学习模型。例如，采用LSTM网络对塔吊振动、电流等时序信号进行建模，识别潜在机械故障；利用YOLOv8对视频流进行实时目标检测，准确识别安全帽佩戴、反光衣穿戴等合规状态；更进一步，通过图神经网络（GNN）建模人员、设备与环境之间的交互拓扑，挖掘隐藏的连锁风险模式^[3]。所有识别结果均按风险等级（红/橙/黄）进行分类，并通过多通道推送机制及时通知相关人员，同时完整记录于安全日志中，为后续审计与优化提供依据。

3.4 可视化交互与决策支持

可视化不仅是信息展示的窗口，更是决策支持的工

具。系统提供多维度的交互式三维视图，用户可通过PC端大屏或移动设备自由漫游整个工地，实时查看任意位置的人员分布、设备状态与环境参数。为深入分析内部作业情况，系统支持对BIM模型进行任意方向的剖切操作，直观呈现隐蔽工程或密集作业区域的安全状况。此外，时间回溯功能允许用户按时间轴滑动，复现历史某一时刻的工地全貌，极大便利了事故原因追溯与责任界定。在应急预案演练方面，系统可在虚拟环境中模拟火灾疏散、高空救援等场景，动态规划最优路径并评估方案可行性，从而提升应急响应的科学性与实效性。管理人员还可通过自然语言查询或预设仪表盘，快速获取《安全态势日报》，掌握风险热力图、设备健康度、人员合规率等关键指标，实现数据驱动的精化管理。

4 讨论与挑战

尽管本系统在实践中取得了良好成效，但在更广泛推广应用过程中仍面临若干现实挑战。首先，数据质量与标准化问题突出。不同厂商的IoT设备数据格式各异，BIM模型的建模深度与精度参差不齐，导致数据融合效率低下，亟需推动行业级数据标准（如IFC for Construction Safety）的制定与落地。其次，高保真物理仿真对计算资源要求极高，难以在普通终端设备上流畅运行，未来可探索“云渲染+边缘推理”的混合架构以平衡性能与成本。再次，人员定位与视频监控涉及个人隐私，必须建立严格的数据访问控制、加密传输与脱敏处理机制，确保符合《个人信息保护法》等法律法规要求^[4]。最后，部分经验丰富的老员工对新技术存在抵触心理，认为增加了操作负担，因此需要配套开展系统化培训，并建立激励机制，逐步培育“人机协同、数据驱动”的新型安全文化。

5 结语

本文设计并实现了一套基于数字孪生的智慧工地安

全监控系统，通过构建物理工地与虚拟模型的实时映射，实现了对人员、设备、环境等安全要素的全面感知、智能分析与可视化管控。该系统可以有效提升工地安全事件的响应速度与处置效率，显著降低事故发生率，验证数字孪生技术在建筑安全领域的巨大潜力。未来工作将聚焦于三个方向：一是引入数字线程（Digital Thread）技术，打通设计、施工到运维全生命周期的安全数据链，实现风险信息的无缝传递；二是结合生成式AI技术，支持自然语言交互查询与自动化安全报告生成，降低使用门槛；三是探索数字孪生与元宇宙的深度融合，构建沉浸式虚拟安全培训环境，提升作业人员的风险意识与应急能力。数字孪生不仅是技术工具，更是管理理念的革新。唯有将先进技术与工程实践深度融合，才能真正实现“科技兴安、本质安全”的终极目标。

参考文献

- [1]陈菲,祝昕怡,田晟瑶,等.一种基于AI数字孪生技术的工地时空安全保障系统[C]//四川省电子学会,重庆市电子学会,四川省职业技能竞赛研究中心.2022年川渝大学生“数智”作品设计应用技能大赛暨第八届四川省大学生智能硬件设计应用大赛会议论文集.重庆交通大学,2022:138-146.
- [2]梁爱萍,张发清,蔡运忠,等.基于BIM+GIS+IoT技术的水利工程数字孪生工地建设管理系统研究与应用[J].水利技术监督,2024,(02):39-43.
- [3]肖丽娜,张磊,笪美姜.基于数字孪生的轨道交通智慧工地与智能运维系统集成研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.天津轨道交通线网管理有限公司,2025:436-437.
- [4]任贺.智能建造技术在智慧工地监控中的应用研究[J].陶瓷,2025,(12):153-155.