

5G 智慧工地融合调度模型

张江波

1 信阳航空职业学院, 河南信阳 464100

2 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 河南郑州 450000

【摘要】针对智慧工地中数据分散、信息孤岛、实时感知不足、风险预警滞后以及资源调度粗放等问题,本研究提出了一种基于5G-IoT的多源异构数据融合与实时调度模型。系统采用“感知层—网络层—平台层—应用层”四层架构,融合环境传感、视频监控、BIM、人员定位、设备状态和物料追踪等多源数据,并依托5G与边缘计算实现低时延传输和近端分析。在模型层面,构建数据层、特征层和决策层三级融合框架,引入多模态关联分析、时空关系建模和知识图谱表示,提升复杂施工场景下的信息整合与语义推理能力。在调度层面,建立兼顾工期、成本与安全风险的多目标优化模型,并结合深度强化学习实现动态自适应调度。试点结果表明,该模型能够提升现场管理效率、资源利用率和安全预警能力,对智慧工地系统集成和精细化管理具有较强工程价值。

【关键词】5G-IoT; 智慧工地; 数据融合; 实时调度; 数字孪生

一、引言

建筑业正由传统粗放式管理向数字化、智能化管理转型。随着工程规模扩大、施工组织复杂化以及安全监管趋严,传统依赖人工巡检、经验调度和分散系统管理的方式已难以满足现代施工现场精细化管控需求。在大型房建和基础设施项目中,现场参与主体多、工序交叉频繁、人员设备流动性大,常导致信息传递滞后、风险识别不足和资源配置失衡,进而影响工期、成本与安全目标。

近年来,5G、物联网、人工智能、BIM、数字孪生和边缘计算的发展,为智慧工地建设提供了关键技术基础。其中,5G具备高带宽、低时延和海量连接优势,可支撑高并发视频流、设备状态信息和控制指令的实时传输;IoT技术可实现对人员、设备、材料和环境的持续感知;BIM与数字孪生则为施工过程可视化、状态映射与方案优化提供统一模型基础。在此背景下,智慧工地正由单点信息化应用走向多系统协同和全过程智能决策。

现有研究已在视觉安全监测、数字孪生平台、多源感知融合和智能调度等方面取得进展。例如,部分研究基于视觉识别实现违规行为检测和安全状态评估;部分研究关注BIM与数字孪生融合,以提升施工进度可视化能力;还有研究从云边协同和低时延预警角度提高智慧工地实时响应水平。但总体来看,仍存在三方面不足:一是多源异构数据虽被采集,但标准不统一、语义不一致,难以形成高效融合;二是多数研究偏重监测与预警,缺乏与资源调度联动的决策闭环;三是在复杂动态环境下,智能调度与现场知识表达结合仍不充分。

基于此,本文提出一种基于5G-IoT的智慧工地多源异构数据融合与实时调度模型。研究重点包括:构建面向施工现场的四层系统架构;设计数据层、特征层和决策层三级融合机制;引入时空建模与知

识图谱增强现场语义理解；建立面向工期、成本和风险的动态调度优化模型，并通过试点项目验证方法可行性。

二、系统架构设计

系统采用“感知层—网络层—平台层—应用层”四层体系结构，如图 1 所示。感知层部署环境监测传感器、高清视频摄像头、UWB 定位标签、塔吊与升降机监测装置、RFID 物料识别终端和移动巡检设备，实现对“人、机、料、法、环”关键要素的实时采集。网络层采用 5G 专网与有线网络协同模式，并在塔吊区、材料堆场、深基坑和人员密集区域部署 MEC 边缘节点，以满足视频监控、设备控制和环境监测等业务对时延、带宽和连接稳定性的差异化需求。

平台层主要包括数据接入管理、异构数据融合、风险识别分析、知识图谱推理、实时调度优化和数字孪生显示等模块。各类现场数据经统一接口接入后，首先完成协议解析、时间对齐、缺失补全和异常剔除，再形成可供模型分析的混合数据集。平台同时支持历史数据沉淀、规则库管理、预警日志追踪和结果回溯。应用层面向项目经理、安全员、机管员和施工班组提供差异化服务，如进度偏差监测、危险行为告警、设备维保提醒和资源调配建议等。

为解决现场设备来源复杂、接口标准不一的问题，系统建立统一的数据接入规范，对串口、TCP/IP、MQTT 和 HTTP 等协议进行适配，并在预处理阶段执行清洗、归一化、时间同步和脱敏处理。对视频流数据，边缘节点负责目标检测和关键帧筛选；对传感数据，采用滑动窗口去噪和异常剔除；对 BIM 模型数据，则通过构件编码与现场实体建立映射关系，以支撑后续多源融合和数字孪生更新。



图 1 “感知层—网络层—平台层—应用层”四层体系结构

三、多源异构数据融合模型

智慧工地数据具有来源多样、结构异构、时空耦合强和实时性要求高等特点，从形式看，既包含传感器数值、定位轨迹等结构化数据，也包含图像、视频和巡检文本等非结构化数据；从时间特性看，不同数据源采样频率差异显著；从空间特性看，各类数据又与楼层、工区、设备位置和工序节点紧密关联。单一数据源或简单拼接方式难以支持复杂施工场景下的准确识别与高效决策。

为此，本文构建三级融合框架。第一层为数据层融合，解决多源数据在时间、空间和格式上的一

致性问题。系统依据统一时钟机制完成时间对齐，并以工区、构件、设备和楼层为索引建立空间映射关系，形成可统一检索的基础数据表。第二层为特征层融合，从视频、传感、定位和BIM模型中提取与安全、进度和资源状态相关的高层语义特征，并通过统一表示空间实现跨模态关联。例如，将“塔吊载荷变化”“风速突增”“人员靠近危险边界”等特征进行联合表达，以描述复合风险情景。第三层为决策层融合，结合规则库、知识图谱和状态评估结果，实现异常识别、风险分级、资源冲突判断和调度建议输出。

考虑施工风险事件通常具有明显的时空传播特征，本文进一步构建施工对象间的时空关联模型。模型以工区、设备、人员和工序为节点，以位置相邻、时间重叠、工序依赖和资源占用等关系为连接边，用于刻画施工活动间的相互影响。例如，塔吊作业与吊装区存在空间联动，雨天环境与脚手架作业存在风险耦合，材料进场延迟又会影响后续工序启动时间。通过对这些关系实行持续建模，可增强系统对风险演化和进度扰动的识别能力。

为提升语义理解和推理水平，本文引入知识图谱方法，构建“人员—设备—工序—材料—环境—风险”多实体关联网络，通过“负责”“依赖”“作用于”“位于”“影响”等关系组织施工知识，使系统能够对异常事件进行语义解释。例如，当系统识别到“风速超限+塔吊起吊+吊物下方存在人员停留”时，可基于图谱规则快速判定其高风险属性，并触发相应预警和调度策略。相较于传统阈值判断方式，该方法更适用于多因素耦合和上下文依赖强的施工场景。

四、实时调度优化模型

智慧工地资源调度涉及人员、机械、材料和作业面的协同配置，本质上属于多约束、多目标动态优化问题。施工现场状态会随着天气变化、设备故障、工序衔接、材料供应和人员出勤不断变化，若仍采用静态人工计划方式，容易导致工序冲突、设备闲置或作业等待，最终造成工期拖延和成本增加。

本文以总工期最短、综合成本最低和安全风险最小为主要目标建立调度模型。其中，工期目标反映项目整体进度控制需求；成本目标综合考虑人员投入、设备运行、材料等待和返工损失；风险目标重点衡量高风险区域、危险天气和设备高负荷状态下的作业水平。约束条件包括工序逻辑、资源容量、时间窗口、空间冲突和安全距离等。通过建立目标函数与约束集，可对复杂施工调度问题进行形式化描述。

在调度机制上，本文采用“初始优化+动态修正”的两阶段策略。首先，根据施工计划、资源储备和BIM工序逻辑生成初始调度方案，用于给出各班组、机械和材料的基准配置；随后，在施工过程中结合传感器、视频、定位和进度反馈持续监测现场状态，当出现设备异常、天气突变、作业拥堵或进度偏差时，系统自动触发调度重算。这种滚动优化方式可使调度方案更贴近现场实际，减少人工计划滞后带来的损失。

为增强模型的自适应能力，本文引入深度强化学习实现动态调度决策。状态空间由工序进度、资源占用、设备运行状态、环境风险和现场拥堵程度共同构成；动作空间包括设备调配、班组切换、工序延期、施工顺序调整和作业区重分配；奖励函数综合反映工期缩短、成本降低、风险削减和资源均衡利用效果。通过持续训练，模型能够在复杂动态环境下学习更优策略，提高调度效率和鲁棒性。

五、系统实现与关键技术

系统实现采用前后端分离与模块化部署方式。前端通过Web界面和移动端应用展示实时进度、风

险热区、设备状态和资源分布，为不同角色提供可视化管理入口。后端则按数据接入、融合分析、模型推理、预警服务和调度执行等功能解耦，便于后续升级与跨项目复制。为提升高并发场景下的响应能力，边缘节点承担视频初检、局部识别和异常过滤任务，平台侧负责全局推理和统一调度。

数字孪生是系统实现的重要组成部分。本文以 BIM 模型为基础构建现场三维数字映射，并将人员位置、设备状态、环境参数和施工进度信息实时叠加至模型中，实现“现场—模型—管理”联动。当现场状态发生变化时，平台可同步更新数字孪生界面，为管理人员提供工序进展、风险分布和资源占用的直观展示。相较于传统二维报表，该方式更有利于发现施工冲突和进度偏差。

安全预警采用“边缘快速响应—平台综合研判—智能预测预警”三级机制。一级预警部署在边缘侧，重点识别塔吊超载、人员进入危险区域和设备越限等高时效事件；二级预警部署在平台侧，对环境超限、设备波动和作业面拥堵进行综合分析；三级预警基于历史数据、知识图谱和智能模型，对违规行为频次、风险趋势和潜在事故链条进行预测。预警结果通过大屏、APP 和消息接口多通道推送，并记录处置过程形成闭环管理。

六、实验与应用验证

本文在某住宅建设项目开展试点应用，项目包含地下结构、主体结构和机电安装等多个阶段，现场具有设备种类多、工序交叉频繁和作业区变化快等特点。系统部署了环境监测设备、高清摄像头、UWB 定位终端、机械运行采集装置和边缘计算节点，并通过 5G 网络完成各类数据接入。在连续运行过程中，系统对人员活动、设备运行、环境状态和工序进展进行了持续采集和分析。

从数据融合效果看，多源融合方案在综合判断准确性和情景识别能力方面优于单一数据源方法。例如，仅依赖视频监控时，部分遮挡场景下对危险行为识别存在漏报；加入定位与环境数据后，系统可结合人员轨迹、区域风险和环境波动进行联合判断，从而提高识别稳定性。对于现场异常事件，云边协同处理模式可明显缩短从感知到预警输出的时间，更适合高风险区域的实时管控。

从调度优化效果看，系统在主体结构施工阶段对塔吊使用、材料上料和班组作业顺序进行了动态优化。与传统人工计划方式相比，系统能够根据设备繁忙程度、材料到场时间和作业冲突情况自动调整作业安排，从而减少等待时间和无效周转。同时，结合数字孪生进度映射，管理人员可更早发现计划偏差并及时采取纠偏措施。在安全管理方面，系统对高处作业、危险区域闯入和设备异常等情形实现了持续识别与闭环记录，提升了隐患整改效率。综合来看，该模型在管理提效、风险控制和协同决策方面表现出较好的应用潜力。

七、结论

本文面向智慧工地复杂施工环境，提出了基于 5G-IoT 的多源异构数据融合与实时调度模型。研究构建了感知、网络、平台和应用四层系统架构，设计了数据层、特征层和决策层三级融合机制，并结合时空关联建模与知识图谱提升施工场景语义理解能力；在此基础上，建立了兼顾工期、成本和安全风险的动态调度优化模型，通过深度强化学习实现对现场扰动的自适应响应。试点结果表明，该模型在信息整合、预警响应、资源协调和进度控制等方面具有较好效果，可为智慧工地平台建设和智能建造实践提供参考。

八 局限性展望

尽管本文模型在试点项目中取得了较好效果，但在大范围推广中仍面临一些现实问题。首先，系统建设涉及感知设备、网络通信、平台软件和模型训练等多个环节，初期投入相对较高；其次，不同设备厂商之间的数据接口和传输协议尚未完全统一，增加了系统集成难度。此外，施工项目类型差异较大，不同地区、不同工法和不同管理习惯会影响模型泛化能力，一线作业人员对智能系统的接受度也需要逐步提高。未来可从以下几个方面进一步完善：一是加强轻量化部署与低成本感知技术研究，降低智慧工地推广门槛；二是推动数据标准、接口规范和平台互联机制建设，提高系统兼容性；三是结合迁移学习、联邦学习和知识增强推理，提升模型在跨项目场景下的适应能力；四是将智慧工地系统与绿色建筑、能耗管理和碳排放控制进一步结合，拓展其在工程全生命周期管理中的应用空间。

参考文献

- [1] Chen Y, Wu P, Li Q. BIM-IoT integrated framework for intelligent construction management: recent advances and applications[J]. *Buildings*, 2022, 12(11): 1876.
- [2] Hosseini M R, Martek I, Zavadskas E K, et al. A bibliometric analysis of digital twin research in the construction industry[J]. *Automation in Construction*, 2022, 142: 104518.
- [3] Lu Q, Xie X, Parlikad A K, et al. From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management[J]. *Automation in Construction*, 2022, 144: 104613.
- [4] Chen J, Li H, Wu Z, et al. A review of vision-based monitoring and safety management on construction sites[J]. *Buildings*, 2022, 12(9): 1380.
- [5] Wang M, Yang J, Lin Y, et al. Digital twin-driven smart construction site management: technologies, applications and challenges[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72: 106675.
- [6] Huang L, Zhao Y, Wang J. Multi-source sensing data fusion for smart construction site safety management[J]. *Automation in Construction*, 2023, 152: 104920.
- [7] Zhang X, Liu H, Chen Y. Edge-cloud collaborative architecture for 5G-enabled smart construction monitoring[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2023, 149(9): 04023078.
- [8] Chen C, Xiao J, Zhou Z, et al. Knowledge graph-enabled digital twin for construction safety management[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2023, 58: 102141.
- [9] Ding L, Fang W, Zhong B, et al. Vision-based unsafe behavior recognition on construction sites using deep learning: recent advances and prospects[J]. *Automation in Construction*, 2023, 151: 104874.
- [10] Kim S, Park J, Lee H. Real-time resource scheduling for smart construction based

- on deep reinforcement learning[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 60: 102345.
- [11] Singh R, Kumar A, Bose I. Heterogeneous data integration and intelligent decision-making in construction digital twins[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 88: 109002.
- [12] Zhou Y, Li X, Zhang H, et al. Multi-modal data fusion for intelligent monitoring of construction sites: a review[J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2024, 31(5): 1849-1872.
- [13] Liu Z, Wang P, Chen K, et al. Edge intelligence for low-latency safety warning in smart construction[J]. *Automation in Construction*, 2024, 160: 105318.
- [14] Sun Y, Liu R, Zhao X, et al. Dynamic scheduling optimization for construction projects under uncertain environments using deep reinforcement learning[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2024, 150(6): 04024041.
- [15] Zhao H, Xu G, Wu P, et al. Digital twin and BIM integration for real-time construction progress monitoring[J]. *Buildings*, 2024, 14(3): 744.
- [16] 孙冠群. 面向智慧城市的多源传感器数据融合方法研究 [J]. *计算机应用文摘*, 2025, 41(15): 87-89.
- [17] 魏鸿斌, 陈浩源. 基于 5G+MEC 的智慧工地研究测试 [J]. *数据通信*, 2020(6):1-4.
- [18] 魏锡年. 基于物联网的智慧工地安全管理系统的研究 [J]. *自动化应用*, 2025, 66(10): 306-308, 312.
- [19] 住房和城乡建设部. 智能建造技术导则(试行) [S/OL]. (2025-02-17)[2025-03-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202503/content_7014454.htm.
- [20] 中国信息通信研究院. 5G 赋能建筑行业数字化转型发展报告 [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2024.

Smart Construction Fusion Scheduling Model Based on 5G-IoT

ZHANG Jiangbo

1 Xinyang Aviation Vocational College, Xinyang, Henan 464100, China

2 Henan Urban and Rural Planning, Design & Research General Institute Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China

Abstract: To address dispersed data, information silos, insufficient real-time perception, delayed risk warning, and inefficient resource scheduling in smart construction sites, this paper proposes a multi-source heterogeneous data fusion and real-time scheduling model based on 5G-IoT. The system adopts a four-layer architecture including perception, network, platform, and application layers. Multi-source data from environmental sensing, video surveillance, BIM, personnel positioning, equipment status, and material tracking are integrated through 5G and edge computing for low-latency transmission and near-end analysis. A three-level fusion framework covering data-level, feature-level, and decision-level fusion is developed, together with multi-modal association analysis, spatiotemporal modeling, and knowledge graph representation. A multi-objective optimization model considering duration, cost, and safety risk is further established, and deep reinforcement learning is introduced for dynamic scheduling. Pilot results show that the proposed model can improve on-site management efficiency, resource utilization, and safety warning capability.

Keywords: 5G-IoT; Smart construction site; Data fusion; Real-time scheduling; Digital twin

版权所有 © 2026 本文作者和香港科技出版集团。本作品根据知识共享署名国际许可证 (CC BY 4.0) 获得许可。 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access