

数字孪生技术在钢结构装配式工程施工中的应用

凌研方

北京城建集团有限责任公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8560

[摘要] 伴随着建筑工业化进程的不断加快, 钢结构装配式建筑由于具有绿色环保、施工高效等优势, 成为了建筑业转型升级的重要方向。但是传统的施工管理模式不能满足装配式工程精细化、智能化的管理要求。数字孪生技术作为新一代信息技术的集成应用, 它构建物理实体与数字模型的动态映射关系, 实现施工全过程的可视化监控, 精确管理以及智能化决策。从钢结构装配式工程施工的实际需要出发, 系统阐述了数字孪生技术应用背景的意义, 对数字孪生技术在施工可视化模拟、构件装配指导、进度质量管理等各方面的具体应用实践进行了详细的分析。

[关键词] 数字孪生技术; 钢结构装配式; 施工管理; 智慧建造; BIM技术

Application of Digital Twin Technology in Steel Structure Prefabricated Engineering Construction

Ling Yanfang

Beijing Urban Construction Group Co., Ltd

[Abstract] With the continuous acceleration of the construction industrialization process, steel structure prefabricated buildings have become an important direction for the transformation and upgrading of the construction industry due to their advantages of green environmental protection and efficient construction. However, the traditional construction management model cannot meet the requirements of refined and intelligent management for prefabricated engineering. As an integrated application of the new generation of information technology, digital twin technology constructs a dynamic mapping relationship between physical entities and digital models, realizing visual monitoring, precise management, and intelligent decision-making throughout the construction process. Starting from the actual needs of steel structure prefabricated engineering construction, this article systematically elaborates on the significance of the application background of digital twin technology, and provides a detailed analysis of the specific application practices of digital twin technology in construction visualization simulation, component assembly guidance, schedule quality management, and other aspects.

[Key words] digital twinning technology; Assembled steel structure; Construction management; Smart construction; BIM technology

引言:

目前, 我国建筑业正处在由传统建造方式向工业化建造方式转变的重要阶段。钢结构装配式建筑凭借构件标准化、施工装配化、管理信息化等特点, 成为推进建筑工业化的主要载体。但是钢结构装配式工程施工包含设计、加工、运输、装配等多个环节, 施工精度、进度协调、质量控制的要求更高。传统的二维图纸、经验式管理模式已经不能满足复杂工程的管理需求, 在施工过程中存在着信息传递滞后、协同效率低、质量控制难等问题。数字孪生技术是物联网、大数据、人工智能等技术的融合创新, 通过建立物理空间与数字空间的实时映射与交

互, 给钢结构装配式工程施工提供了一种新的管理范式。

一、数字孪生技术应用的背景与意义

(一) 钢结构装配式工程施工的发展需求

钢结构装配式建筑作为建筑工业化的重要表现形式, 施工特点决定了它对信息化管理的迫切需求。装配式施工把建筑构件的生产和安装分开, 施工现场主要进行构件的吊装、连接等, 建造模式对构件的加工精度、运输时序、现场装配等环节的协同性要求很高。施工过程中任何一个环节出现偏差都可能导致构件无法精准对接, 影响整个施工进度和质量。同时, 钢结构工程往往涉及大量异形构件和复杂的节点, 施工人员仅凭传统

图纸很难准确把握空间关系和装配逻辑。此外，多专业交叉施工、多工种协同作业的特点使现场管理的复杂程度大大增加，传统管理方式无法达到各参与方之间信息共享和高效协作的目的。因此钢结构装配式工程施工急需一种可以整合全过程信息、实现精准管控、促进多方协同的新型技术手段来克服传统管理模式的瓶颈，满足工业化建造对施工管理精细化、智能化的要求^[1]。

(二) 数字孪生技术赋能智慧建造的价值

数字孪生技术通过融合建筑信息模型、物联网感知、数据分析这些技术，创建起物理建造过程和数字虚拟空间的动态映射体系，为智慧建造提供了强大的技术支撑。该技术可以将施工现场的实时状态用数字化的方式精准的呈现出来，使管理者可以在虚拟环境中全面掌握施工进度、资源配置、质量情况等重要信息，实现从被动管理到主动预控的转变。数字孪生体是物理实体的数字化映射，可以实时反映当前的施工状况，也可以通过数据驱动的仿真分析，预估施工期间可能发生的状况并预先制订解决策略，有效降低施工风险。数字孪生技术打破了传统信息孤岛，给设计、施工、监理等各方提供统一的信息平台，促进了跨组织、跨专业的协同工作^[2]。

(三) 提升施工质量与效率的现实意义

应用数字孪生技术对提高钢结构装配式工程的施工质量、效率有重要意义。在质量管控方面，该技术通过建立数字化质量标准模型，把设计要求转化成可以量化的、可以追溯的数字化指标，实现了质量检验由抽样检查向全过程监控的转变。施工过程中每一个操作环节、每一个质量数据都可以被实时采集并与标准模型进行对比，任何偏差都可以被及时发现并加以纠正，从根本上保障了工程质量。效率提高，数字孪生技术利用施工过程的虚拟预演和优化仿真，使管理者能提前发现施工难点，优化施工方案，合理分配资源，避免现场返工和窝工。该技术支持下的可视化交底和智能化指导，降低了施工人员理解难度，减少因沟通不畅造成的错误操作，提高了施工效率。另外，数字孪生技术实现多方信息共享、协同决策，缩短了问题响应时间，加快了审批进度，很大程度上提高了整体施工效率，为降本增效、提质增速的建造目标提供强有力的支撑^[3]。

二、数字孪生技术在施工中的应用实践

(一) 施工全过程可视化模拟与监控

数字孪生技术通过建立施工过程的三维可视化模型，实现了设计方案到竣工交付全生命周期的动态模拟和实时监控。在施工准备阶段，利用数字孪生平台对施工方案进行虚拟预演，通过模拟各个施工工序所占空间、衔接时间、所需资源，提前发现方案中冲突与不合理之处，为方案优化提供依据。施工实施阶段，在现场布置传感器、摄像头等物联网设备，对施工进度、人员位置、设备状态、环境参数等进行实时采集，将采集到的数据映射到数字孪生模型中，形成与现场施工同步更新的

虚拟施工场景。管理人员可以借助数字孪生平台对施工现场的情况做到实时掌握，对比计划进度与实际进度的差异，进而及时察觉施工过程中出现的异常状况。同时系统可以自动分析施工数据，识别潜在的安全隐患和质量风险，并以可视化的预警方式提示有关人员采取措施^[4]。

(二) 构件精准定位与装配指导

钢结构装配式施工对构件的定位精度要求非常高，毫米级的偏差都会影响到后面的装配。数字孪生技术给构件的精确定位与装配提供智能化方案。通过对构件植入射频识别标签或者二维码，结合现场定位系统，可以对每个构件从加工厂到施工现场的全过程位置信息进行实时跟踪，确保构件按照施工计划准时到场，避免构件错运、漏运导致的工期延误。构件吊装时，数字孪生系统能够将构件的目标安装位置以三维模型形式实时显示在移动终端上，施工人员用增强现实技术看到虚拟构件和实际空间的叠加效果，直观看出构件该放到哪里、怎么安装。系统依据构件当前所在位置和期望到达位置之间的差异，及时得出调整的方向、距离，给吊装操作员提供准确的操作信息。对于复杂的节点，系统会把装配步骤拆分成一些操作环节，用动画加语音提示，引领工人依照正确的次序去做螺栓连接，焊接等工作，从而缩减了由于操作失误引发的质量问题。基于数字孪生的智能装配指导，既能提升构件安装精度和效率，又能削减工人技术水准的影响，给装配式施工标准化作业赋予了技术支撑^[5]。

(三) 施工进度与质量实时管理

数字孪生技术为施工进度与质量管理提供了实时化、精细化的管理手段。在进度管理方面，系统通过集成项目进度计划同现场施工数据结合起来，形成起进度偏差自动识别与预警机制。当实际施工进度滞后于计划进度时，系统能自动算出延误时间和影响范围，分析原因，根据历史数据和人工智能算法生成进度调整建议、赶工方案，帮助项目管理者快速决策。同时，系统支持多层级的进度可视化展示，既能看到总体工程进度，又能看到单项作业进度，便于各级管理人员掌握项目动态。数字孪生技术对于质量管理实现了质量数据的自动采集和智能分析。通过激光扫描、图像识别等技术，系统可以对已经完成的构件安装质量进行自动检测，将实测数据与设计标准进行对比，自动生成质量检验报告，实现了质量检验的客观化、高效化。对关键的质量控制点建立全过程的质量追溯体系，记录每个构件从加工到安装的全部信息，一旦发生质量问题，就可以迅速追查到哪个环节、谁负责。另外，系统凭借大数据分析挖掘质量问题的规律和缘由，给质量改善给予决定依据，促使施工质量管理由事后检验向事前防范，过程把控转变。

三、数字孪生技术应用的保障措施

(一) BIM 与物联网技术的协同集成

实现数字孪生技术的有效应用，首要任务是构建 BIM 和物

联网技术深度融合的技术架构体系。BIM 技术为数字孪生提供了丰富的三维几何信息和工程属性数据,是数字孪生体的静态信息基础,物联网技术通过部署各种感知设备实时采集施工现场的动态数据,给数字孪生体注入了鲜活的生命力。二者的协同集成需要建立统一的数据标准和接口规范,使得 BIM 模型里的构件信息可以同物联网设备获取的即时数据准确对接。即给 BIM 模型上每一个构件指定一个唯一标识码,并在物联网系统中建立相应的数据映射关系,使现场采集到的定位、姿态、应力等数据能直接关联到 BIM 模型上的相应构件上。同时建立数据交互的中间件平台,实现 BIM 软件、物联网平台、数字孪生系统之间的数据自动传输和格式转换。在技术选型上,应选择开放性、兼容性好的软硬件产品,防止出现技术壁垒造成的数据孤岛。此外,还需要建立数据质量控制机制,对采集到的数据进行清洗、校验、补充,保证输入数字孪生系统的数据真实可靠。借助 BIM 同物联网融合起来,就能创建起数据驱动的数字孪生应用环境,从而给施工管理的智能化发展赋予牢固的技术支撑,使得虚拟世界和现实世界可以达到真正意义上的同步映射,并且还能进行双向互动。

(二) 数据采集与分析平台的构建

数字孪生技术的核心价值在于对大量施工数据的采集、处理、分析,因此要建立功能齐全、性能稳定的数据采集和分析平台。平台应该有数据采集层、数据存储层、数据处理层、应用服务层这四个层次。在数据采集层要布置各种类型的传感器和智能终端设备,包括位置传感器、应变传感器、温湿度传感器、高清摄像机、无人机、三维激光扫描仪等,形成一个立体的数据采集网络,实现对施工现场人员、机械、材料、环境等要素的全方位感知。数据存储层用分布式云存储系统解决海量数据存储问题,用区块链技术保证关键数据的安全性、不可篡改性。用大数据分析、机器学习等技术清洗、整合、挖掘数据处理层获取的结构化数据、非结构化数据,得到有价值的信息和知识。利用施工进度预测模型、质量风险识别模型、资源优化配置模型等来实现将数据转化为决策的目的。应用服务层要开发出不同的用户角色的应用功能模块,给项目管理者提供综合决策支持,给技术人员提供专业分析工具,给操作工人提供可视化的作业指导。平台要有较好的扩展性、开放性,能接受第三方接入、功能可定制来满足不同项目的特点。经由搭建起这样的数据采集、保存、剖析、应用综合平台,尽可能地发挥数字孪生技术的作用,给钢结构装配式工程施工管理赋予强大的数据和智能支撑。

(三) 专业人才培养与技术推广机制

数字孪生技术的运用需要专业的技术人才和良好的技术推广机制。目前建筑行业既懂工程技术又懂数字技术的复合型人才严重短缺,成为技术应用的瓶颈。所以必须建立多层次、多渠道的人才培养体系。在高等教育阶段增加土木工程、建筑

学等专业数字建造相关的课程,培养学生的数字素养以及跨学科能力。在职业培训上开发施工管理人员和技术工人数字技能培训课程,采用理论加实操的培训方式,提高从业人员使用数字孪生技术的能力。企业应该建设内部分工协作的培训机制,定期组织技术交流与经验分享活动,培养起一支对项目特点了如指掌、有较强技术运用能力的人员小团队。推广过程中政府扮演引导者的角色,用制定技术标准、推出奖励政策、创建示范工程等方法,营造有利于新技术应用的政策环境。行业协会要创建起技术交流平台,举办现场观摩会、经验交流会等活动来促使成功的经验得以推广共享。企业之间要建立产学研用协同创新机制,共同解决技术应用的问题。也要对应用效果进行评价总结,形成技术应用的反馈,持续改进技术方案和管理流程。人才培育同技术推广同步推进,有利于加快数字孪生技术在钢结构装配式工程中应用的速度,提高建筑业整体数字化水平,给建筑工业化与智慧建造目标的实现提供人才储备和组织保障。

结语

数字孪生技术是数字化与工业化深度融合的结果,给钢结构装配式工程施工管理带来了革命性的变化。该技术依靠创建物理实体同数字模型的动态联系,达成对施工过程的全息感知、精确操控和智能决策,较好地处理了传统管理模式里面信息滞后、协同困难、管控粗放等突出矛盾。从应用实践来看,数字孪生技术在施工可视化、构件装配、进度质量等方面具有明显优势,对提升工程质量、加快施工进度、降低建造成本起到了良好的推动作用。但是技术落地应用还存在技术集成难度大、平台建设投入高、专业人才短缺等现实问题。随着现代信息技术的飞速发展,以数字化、网络化、智能化为主要特征的信息化浪潮正深刻影响和改变着人们的生活方式。

[参考文献]

- [1]张健豪.装配式钢结构智能连接体系全寿命优化研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(8)[2025-07-14].
- [2]杨桦,力云奎,石国凯.浅谈三维建模在钢结构数字设计与智能建造中的应用[J].四川建筑,2024,44(6):68-70.
- [3]张成,李君,刘小磊,等.基于 Tekla 的钢结构数字设计与智能建造应用技术研究[J].建设科技,2024,(3):82-85.
- [4]陈乃炯,陈乃谦,罗裙.BIM 数字孪生驱动的装配式建筑智能协同建造研究[J].山西建筑,2025,51(14):15-18.
- [5]周明,王非凡,温小栋,等.基于数字孪生技术的装配式钢结构体系全生命周期信息化管理研究[J].宁波工程学院学报,2024,36(4):47-52.

作者简介:凌研方,1985年6月出生,女,汉族,籍贯四川省井研县,硕士研究生,经济师,一级造价师,数字化钢结构技术。