

装配式建筑吊装安全风险管理的数字孪生模型建立方法

刘占省 李安修 孟鑫桐 史国梁 曹存发

(北京工业大学 城市建设学部,北京 100124)

摘要 装配式建筑因其施工方便、绿色环保等优点被大力推广。吊装作业作为装配式建筑施工过程的关键环节,其涉及的安管理要素多且关系复杂。目前的吊装安全风险方法仍存在智能化水平低、预测精确度无法保证、安管理要素无法实时控制等问题。针对以上吊装安全风险问题,本文将数字孪生概念引入吊装安全风险领域,分析了吊装安全风险诱发因素,搭建了面向吊装安全管理的数字孪生框架,阐述了数字孪生模型的运行机制。同时,针对数字孪生建模这一关键问题,提出物理吊装过程、虚拟吊装过程、虚实信息交互的建模方法,并在某项目中进行实际应用,验证了方法的有效性,为数字孪生在吊装安全风险方面的应用提供了理论支撑与技术支持。

关键词 装配式建筑; 数字孪生; 吊装安全; 安管理

【中图分类号】 TU17 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1674-7461(2022)03-0026-08

【DOI】 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2022.03.04

引言

装配式建筑发展迅速,但我国装配式建筑仍处于起步阶段,与发达国家相比存在一定的差距。《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》提到在推动装配式建筑发展的过程中,仍存在标准化、智能化、信息化水平偏低的问题,并指出应推动智能建造与建筑工业化协同发展^[1]。囿于装配式建筑施工水平有限,装配式建筑的施工过程成为了安全风险易发环节。其中,吊装作业是装配式建筑的关键环节,吊装作业具有的特点为^[2]:高空作业且预制构件的重量较大;吊装作业为组合运动,危险点多且分散;移动运行范围较大;须多作业工种配合;吊装过程受到周围环境影响较大,各影响因素之间关系复杂。因此,对装配式建筑吊装安全风险方法的研究具有重要的意义。

目前,众多学者对装配式建筑吊装安全风险方法展开了研究。在吊装安全风险识别与评价

方面,荀志远等^[3]通过对装配式建筑安全风险识别分析,提出了采用 DEMATEL 法计算指标权重间的相互影响、应用博弈论计算组合权重的方法,并利用云模型对安全风险进行了评价;李文龙等^[2]构建了基于结构熵权—可信测度理论的装配式建筑吊装施工安全风险评估模型,在实际工程应用中取得了良好的效果,为安全风险评估提供了新思路;Raviva^[4]等对塔吊事故归类总结并采用层次分析法对定量的结果严重程度值进行评估,从而计算出每个事件的总风险潜力。但是上述吊装安全风险识别与评估方法存在主观性强、静态等局限性,因此赵平等^[5]在常规安全风险指标权重确定的方法基础上,引入系统动力学理论,建立了定性定量结合的装配式建筑施工安全风险测量的 SD 模型,解决了施工安全风险系统中动态复杂的问题;段永辉等^[6]基于 SEM(结构方程模型)等数学方法,对装配式建筑施工安全风险的影响程度进行比较和量化,探索风险因素之间的作用机理;申玲等^[7]构建了基

【基金项目】 北京市自然科学基金(面上项目)(编号:82002001)

【第一作者】 刘占省(1983-),男,副教授,主要研究方向:BIM及智能建造技术相关研究。

于云贝叶斯网络(Cloud - BN)的安全风险评估模型,动态评价装配式吊装安全风险状态;Pinto^[8]提出了新的模糊QRAM模型,将安全风险的有效性评估体现为评估维度,并利用模糊集理论增强对语言变量所引出的不精确和不完整的信息,使评估结果更加可靠;部分学者也将智能算法引入到安全风险评估中,例如常春光等^[9]将RS(粗糙集)、SVR(支持向量回归机)引入到装配式建筑施工安全风险预测中;刘名强^[10]等建立了基于RVM(相关向量机)的装配式建筑吊装作业安全预警模型;Melzner^[11]等基于BIM模型及已开发的算法,系统地识别和分类风险,最终生成知识库。

尽管风险识别与评价方法逐渐成熟,其静态、主观性强等局限性也通过引入智能算法得到解决,但对施工现场数据的依赖性较强,装配式建筑吊装过程安全风险管理的智能化水平低、预测精确度低等问题。面对这样的困境,必须引入融合新兴信息技术的安全管理方法来实现实时控制、精准预测。随着信息化技术的发展以及智能发展系列战略的提出,数字孪生技术已成为智能制造领域的研究热点,能够有效地解决复杂的工业问题。“数字孪生”的概念最初在美国航空航天领域被提出,用来预测航天飞行器的使用寿命和故障等,为美国航天业节省了大量的维修维护成本,随之数字孪生技术逐渐扩展到其他行业。数字孪生技术将物理空间信息映射到虚拟空间中,虚拟空间与物理空间之间形成双向的信息交流融合与迭代优化,从而对物理空间的活动起到指导作用。数字孪生技术最大的优势就是能够实现数据的实时感知采集、分析处理、控制优化。陶飞等^[12]在数字孪生车间的研究过程中,提出了数字孪生五维模型的概念,为数字孪生在其他行业的应用打开了新思路。刘占省等^[13-15]将数字孪生技术成功引入到建筑行业,搭建了数字孪生在智能建造领域的应用框架,将数字孪生技术应用到冬奥场馆动态消防疏散、预应力钢结构张拉状态智能监测等方面,取得了良好的应用效果。

基于装配式建筑安全风险管理的局限性,与数字孪生在智能建造中的应用优势,面对吊装作业安全风险影响因素众多且复杂,管理方法智能化水平低等现状。本文将数字孪生的概念引入到装配式建筑吊装安全风险管理的数字孪生框架,并阐述了其建立过

程及运行机制。本文针对数字孪生模型建模这一关键问题,提出了物理吊装过程、虚拟吊装过程、虚实信息交互建模方法,并在实际工程中进行应用,为数字孪生技术实时监测吊装过程的安全风险影响因素的状态并做到及时预测与持续控制奠定基础,为装配式建筑吊装安全风险智能化管理方法提供理论支撑和技术支持。

1 面向装配式建筑吊装安全风险管理的数字孪生框架

1.1 吊装安全风险影响因素分析

确定吊装安全风险影响因素是建立数字孪生模型的前提。数字孪生模型在驱动的过程中,需要对物理吊装施工现场要素信息进行实时感知采集,并把信息映射至虚拟吊装施工现场,分析吊装安全风险影响因素,在施工过程中选取风险诱发及控制对象,对其进行实时监测及控制,可为吊装安全风险预测及控制奠定基础。通过文献调研^[2,7,16,17,18]和工程实际,可梳理出装配式建筑吊装过程安全风险诱发因素,具体如表1所示。

根据表1部分学者总结的吊装安全事故诱发因素,可以得出吊装安全风险影响因素主要包括五方面,并分析了吊装过程中需监测的数据,具体如下:

(1) 人员因素

吊装作业过程中涉及塔吊司机、信号司、施工人员等,因此人员是诱发安全事故最主要的因素之一,而人员由于其移动性较强等特点,是最难控制的要素。吊装作业人员的专业水平与素质、吊装作业时的状态都与吊装安全风险有紧密的联系,在吊装作业过程中,应对人员属性及实时位置进行监测。

(2) 设备因素

塔吊属于重型机械,应对塔吊进行定期维护及检修,保证塔机的工作状态。对塔吊的最大负载、是否有交叉干扰(起吊高度、吊运半径等)等状态进行监测,防止发生因超载、结构疲劳造成塔吊机体的变形、倾覆以及塔吊碰撞等事故。

(3) 构件因素

构件质量不合格、连接强度不足、吊点位置选择不合理等均可能导致脱绳、构件断裂等物体打击事故。对构件状态、位置、数量、吊装机具数据进行监测,及时了解构件吊装的动态路径和吊装顺序,对防止事故的发生具有重要的意义。

表 1 部分学者提出的安全风险诱发因素

学者	主要事故诱发因子
李文龙等 ^[2]	施工操作人员的综合素质; 施工人员状态; 管理人员水平; 构件构造设计; 构件制作质量; 吊装机具的维护检查; 安全防护用品及安全设施标识; 吊装机具的适配性; 吊装方案; 吊装机械锚固方案; 总平面布置的合理性; 吊装天气状况; 工人的技能培训与安全教育; 安全管理体系的完善程度; 标准化作业程度; 应急预案等
申玲等 ^[7]	作业人员技术水平; 作业人员是否违章操作; 安全防护佩戴是否齐全; 参加安全交底人员比率; 预制构件质量水平; 吊装机械实际使用年限; 吊装钢丝绳磨损率; 预制率; 塔吊作业是否交叉干扰; 实际载重比; 现场施工安全管理水平; 安全措施费投入比; 风速大小; 构件堆场布置情况
李强年等 ^[16]	吊装安全人员配置; 吊装作业规范程度; 吊装作业人员技能水平; 吊装作业人员安全意识; 起吊机械操作人员技术; 构架吊装定位技术; 吊装机械与构件连接技术; 临时支撑与安全防护; 起吊机械选型; 吊装机械设备本体质量; 吊装涉及工具安全性; 构件吊点位置选择; 辅助吊索具本体质量; 吊装机械基础状况; 吊装作业气候条件; 吊装作业区域; 安全措施费投入; 吊装作业难度论证; 吊装作业区警示标志; 吊装作业安全教育培训; 风险应急预案
陈伟等 ^[17]	作业人员操作失误; 机械设备维护不足; 吊装机械选型有误; 超载吊装; 构件质量不合格; 构件数量不足; 构件破损; 构件连接强度不足; 构件吊装失误; 构件临时支撑点数量不足; 构件连接技术有误; 构件堆放方式有误; 工程进度压力; 构件吊装安全措施差
马辉等 ^[18]	吊点设置不合理; 吊装设备选型不当; 设备长期超负荷运行; 吊装作业人员操作失误; 塔吊并行作业交叉干扰; 施工人员处于塔吊司机视野盲区; 工人位置与吊运路线冲突; 施工人员未系安全带; 大雪、大雾、大雨、大风等恶劣天气

(4) 环境因素

大雾、大雨、大雪等天气会造成塔吊司机视野盲区增大, 大风天气会影响吊装过程中构件的摆动幅度, 增大吊装的难度与风险。同时, 应及时了解塔吊基础状况, 防止因承载力不足而发生塔吊倾覆。

(5) 管理因素

为了降低安全事故发生的机率, 应该制定完备的安全管理制度体系。利用信息化技术, 对安全防护措施的完备性进行控制, 对吊装方案进行论证, 对人员进行定期的安全培训。

1.2 基于数字孪生的装配式建筑吊装安全风险管理工作框架

结合上述装配式建筑吊装安全风险管理的数字特点与应用需求, 根据国内学者陶飞等^[12]提出的数字孪生五维模型的概念, 其包括物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据、各组成部分之间的连接五个要素, 将其概念引入到装配式建筑吊装安全风险管理的数字孪生框架, 如图 1 所示。

$$M_{DT} = (PH, VH, Rs, DD, CN) \quad (1)$$

式中, PH 为物理吊装过程, VH 为虚拟吊装过程, Rs 为吊装安全风险管理系统, DD 为孪生数据服务平台, CN 为各部分之间的连接。框架中不同要素之间的连接有其不同的含义, 如图 1 所示。

根据上述的吊装安全风险管理工作框架, 其运行机制具体如下:

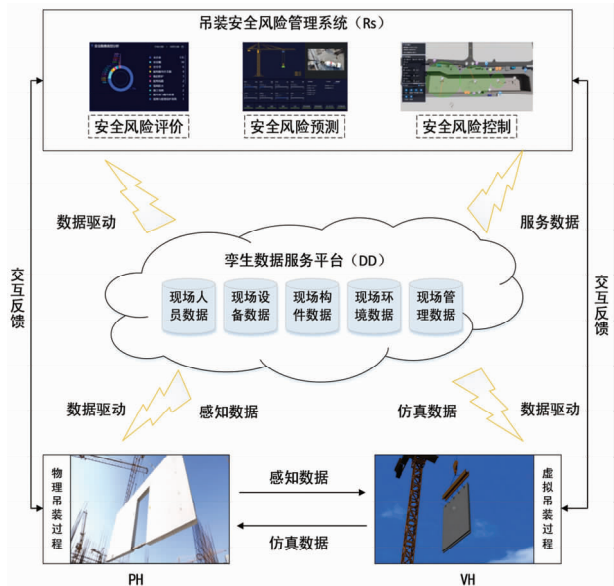


图 1 基于数字孪生的装配式建筑吊装安全风险管理工作框架

(1) PH 是建立数字孪生模型的基础, 是整个数字孪生模型驱动的数据源;

(2) VH 共包含“几何—物理—行为—规则”四个层面的内容, VH 是与 PH 一一映射、实时交互的产物, 可从多维度、多尺度对物理空间的要素进行刻画, 并能够结合物理吊装过程的安全风险管理需求, 对吊装过程进行仿真模拟, 并对要素数据进行分析处理、评价、预测及控制;

(3) DD 集成了物理空间信息与虚拟空间信息, 能够避免 PH 与 VH 之间信息传输出现延迟, 保证数据传输的实时性, 同时还包含提供服务所需的智

能算法、模型、规则标准、专家经验等知识库数据, 还可通过融合物理信息、多时空关联信息、知识库数据等保证信息交互的准确性, 并形成孪生数据库;

(4)Rs 是根据实际需求对数字孪生模型中数据驱动过程的服务封装, 针对吊装过程其可实现风险评估、预测及控制, 并将结果可视化, 展示在移动端、PC 端等, 方便对 PH 的活动进行指导;

(5)CN 实现框架中各组成部分的互联互通:PH 与 DD、Rs 之间可通过传感器、协议传输规范等实现数据的实时采集与反馈, PH 与 VH 之间的连接同协议类似, 物理信息实时传输至虚拟空间内, 用于更新校正各类模型, VH 则通过执行器对 PH 进行实时控制; VH 与 DD 之间的信息传递可通过数据库接口实现, 而 VH 与 Rs 之间通过软件接口实现双向通讯; Rs 与 DD 平台之间通过数据接口进行数据的储存与运行优化。

2 装配式建筑吊装安全风险数字孪生模型建立方法

数字孪生模型的建立是实现数字孪生技术的关键, 同时也是一个难点问题。基于制造业数字孪生模型建立相关理论^[19], 从物理吊装过程、虚拟吊装过程与吊装安全风险应用系统融合的视角出发, 通过上述对装配式建筑吊装安全风险的认识, 结合数字孪生技术的实现逻辑, 对装配式建筑吊装过程数字孪生模型进行建模, 为后续数字孪生技术实现落地应用奠定基础。

基于数字孪生的装配式吊装过程建模内容包括物理吊装过程建模、虚拟吊装过程建模以及两者之间的信息交互建模。物理吊装过程建模是针对吊装现场所涉及的“人—机—料—法—环”五大要素的特征进行采集, 虚拟吊装过程建模^[12,19]则是在“几何—物理—行为—规则”的层面上, 融合仿真模拟所需的数据, 集成数字化仿真模型, 物理吊装过程与虚拟吊装过程之间的映射交互基础为虚实信息交互建模, 以解决物理空间与虚拟空间信息不同步、一致性差等问题^[12]。

2.1 物理吊装过程建模

通过对吊装安全风险诱发因素的分析, 需要从物理空间提取的信息有人员属性和位置信息、构件基本属性和力学信息、塔吊设备状态信息、周围环境信息。物理吊装过程建模主要对物理空间信息

进行采集与传输。

吊装过程所涉及的构件包括叠合板、预制梁、预制柱、预制楼梯等, 在构件制作过程中将载有构件型号、尺寸、安装位置、生产单位、强度等信息的主动式 RFID 标签埋入预制构件中, 通过识别标签即可从数据库中获取构件的属性信息。随着吊装过程的进行, 利用传感器对构件的力学信息(例如位置、应力、应变等)进行采集, 以确保构件在起吊过程中处于安全状态, 传感器模块将采集到的构件力学信息进行采集与传输, 其在一定程度上具备数据自主运算与处理功能。

塔吊作为进行吊装施工过程的基础, 其物理信息的采集与传输原理与构件类似, 但额外增加了执行控制模块。在建模过程中, 为每一台塔吊设备配备 RFID 读写器与天线去获取构件信息及人员属性、位置信息, 可实时更新构件力学信息, 判别操作人员是否为专业人员, 获取塔吊作业范围内其他施工作业人员的位置信息。塔吊设备的吊重、倾角、风速、高度、幅度、应力应变等信息通过布置传感器来, 传感器模块将数据进行传输与初步处理的同时, 还会向执行控制模块发出指令, 对塔吊设备运动状态进行自动控制。

构件信息与塔吊设备信息为多源异构数据, 需要对构件信息与塔吊设备信息进行融合集成, 利用无线传输技术(例如:LoRa 技术、NB-IoT 技术等)及其相应的传输通讯协议在配有主动式 RFID 标签、传感器的构件与设备之间建立连接的桥梁, 实现物理吊装现场中人—机—物—环境等异构安全风险影响要素的全互联与融合, 进一步通过数据处理分析模块, 将数据进行整合集成, 并进行储存。

物理吊装过程建模具体如图 2 所示。

2.2 虚拟吊装过程建模

为了实现对物理空间高保真度仿真模拟, 需要从“几何—物理—行为—规则”四个层面进行多维度、多尺度的数字孪生虚体建模, 即在本研究中, 针对吊装过程建立几何模型、物理模型、行为模型、规则模型。

几何模型主要描述吊装施工现场各组成实体的几何参数, 例如构件的尺寸、编号、位置、装配关系等, 可以通过 Revit、3DMax 等软件建立几何模型, 并渲染模型细节使之与物理空间具备良好的一致性。在几何模型的基础上, 增加对吊装过程所涉及



图2 物理吊装过程建模

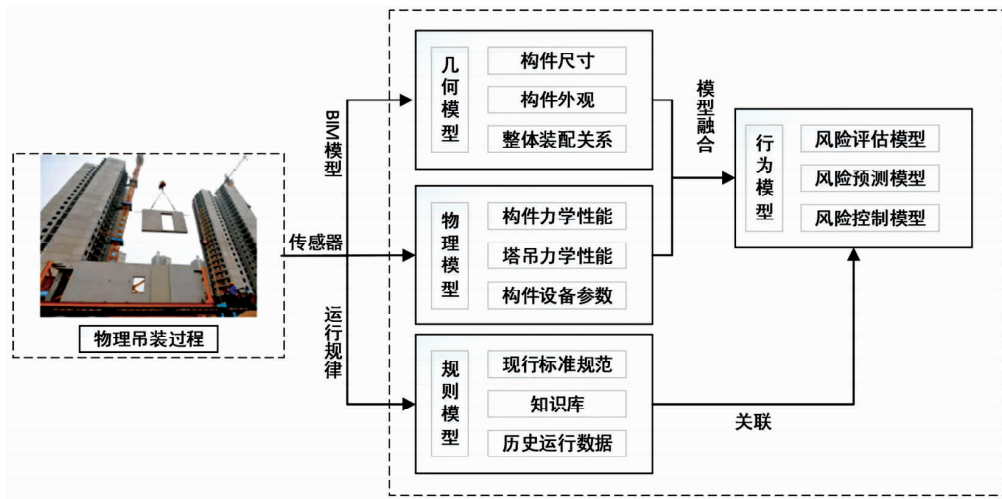


图3 吊装过程安全风险管理的数字孪生虚体模型建立过程

的构件、塔吊设备的力学性能等的描述,结合现场实际工况在 Midas、Ansys 等有限元分析软件中建立起物理模型。行为模型是指通过物理模型与现场布置的传感器等设备采集到应力、应变等数据融合,并关联三维几何模型,在共同作用机制下通过诸多智能算法形成评估模型、决策模型、预测模型,对吊装过程的实际情况做出实时响应。规则模型是指关联国家现行的标准规范、历史数据库等,为行为模型建立过程提供一个评估、预测、控制的规则。随着时间的推移,伴随吊装过程数据的产生,数字孪生模型不仅仅是将数据分析结果反馈至吊装施工现场,规则模型可实现自学习、自演化、自增长,不断提高虚拟吊装过程模型实时评估、决策、预测的能力。

综上所述,将以上四种模型进行融合、集成,实现虚拟吊装过程对物理吊装过程的仿真。几何模型与物理模型融合赋予模型行为与反应能力,行为模型与规则模型关联并将两种模型参数化赋予模型安全风险评估、预测、控制的能力。针对吊装过

程安全风险管理的虚拟吊装过程建模过程如图3所示。

2.3 虚实信息交互建模

虚实交互关联建模主要解决物理吊装过程与虚拟吊装过程之间的数据实时传输问题,即物理吊装过程信息如何实时传输至虚拟吊装过程,对虚拟吊装过程模型进行更新;虚拟吊装过程的仿真数据如何实时反馈至物理吊装过程,对物理吊装过程可能出现的安全问题进行监测、预测及控制。本研究具体的实现逻辑如下:物理吊装过程与虚拟吊装过程之间通过高速稳定的无线传输技术建立双向传输通道,对所采集的数据进行统一、融合、集成,对照物理吊装现场,利用 BIM 技术建立三维模型,将在现场采集到的构件、设备、人员等信息在三维模型中进行可视化。通过有限元分析软件对构件力学性能分析,传感器实时采集塔吊设备数据,并关联三维模型,不断对三维模型进行修正,并将安全状态判别规则导入 BIM 模型中,在马尔可夫链、随机森林、深度学习、BP 神经网络等算法的驱动下,实

现吊装安全风险管理系统的安全风险评估、预测、控制功能。

3 案例研究

基于上述的数字孪生模型建立方法,本文以北京某办公类综合建筑工程项目为例,该项目主体为装配式钢结构,由三座塔楼及其之间的展厅裙楼组成,总建筑面积 $127\ 800\text{m}^2$,最大的高度达到 60m ,最大层数为 15 层。

3.1 物理吊装过程建模

对物理吊装现场进行建模,为钢构件、人员赋予RFID标签,并在塔吊设备上配置RFID读写器,以获取钢构件属性信息与人员属性、位置信息,为虚拟吊装过程建立奠定基础;在钢构件上布置应力传感器以监测构件的力学性能,依靠各类传感器来监测塔吊设备的吊重、风速、倾角、高度、幅度等力学信息并能够对数据进行分析;将所采集到的钢构

件与塔吊设备的多源异构数据通过NB-IoT传输网络、传感器传输网络、GPS传输网络上传,并进行数据的统一融合,形成孪生数据库,物理吊装现场建模具体过程如图4所示。

3.2 虚拟吊装过程建模

对于虚拟吊装现场建模,利用Revit软件参照物理吊装现场构件及塔吊设备的参数,建立三维BIM模型,并结合现场的工况应用ABAQUS有限元分析软件对处于吊升阶段的钢构件进行实时的力学分析,BIM软件与ABAQUS有限元分析软件可通过开发的软件接口实现数据的互联互通,以规范限值对仿真数据进行约束,为安全风险预测奠定基础。由此实现了“几何—物理—行为—规则”四个层面模型的融合,虚拟吊装过程建模如图5所示。

3.3 虚实信息交互建模

物理吊装现场与虚拟吊装现场之间的信息通过NB-IoT无线传输技术及相应的网络传输协议

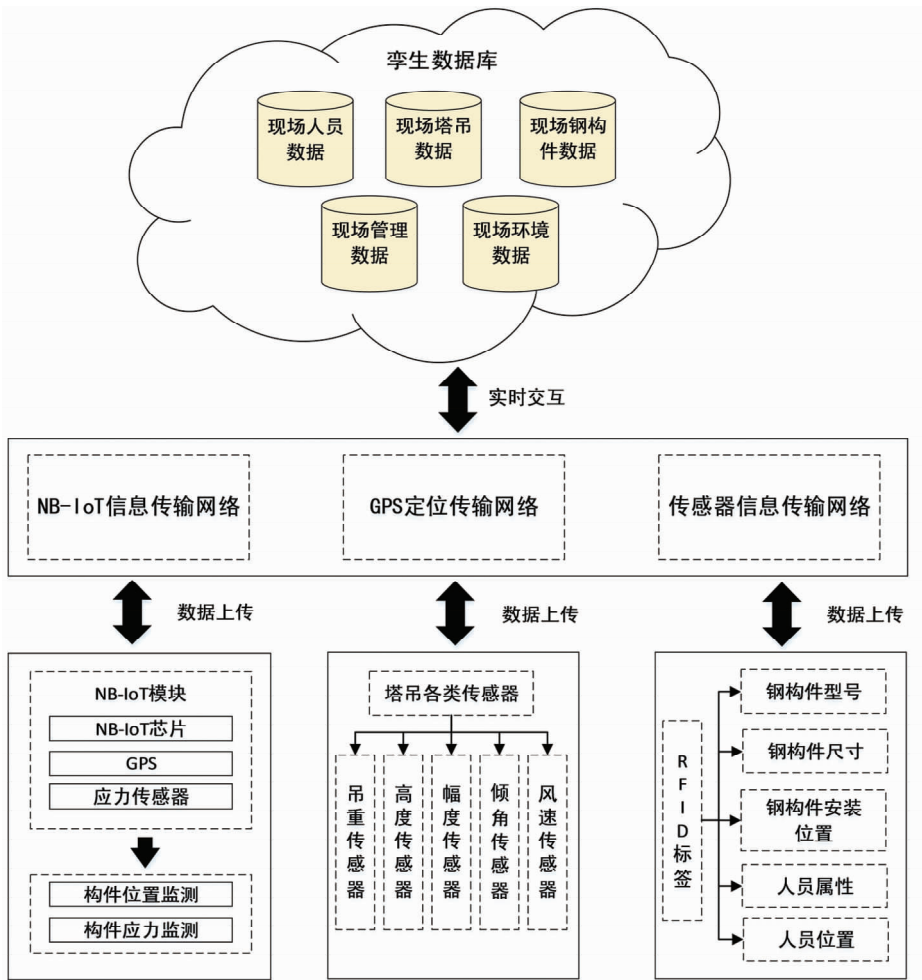


图4 物理吊装现场建模过程

来进行实时交互。基于现有的塔吊运行数据与规则,以深度学习智能算法进行驱动,将数据一部分分为训练集,一部分分为测试集,不断进行训练学习,最终达到对吊装过程中存在的安全风险进行判别,并促进数据库自学习、自增长、自判断,从而对吊装过程存在的安全风险类型进行精确预测,虚实信息交互建模如图5所示。

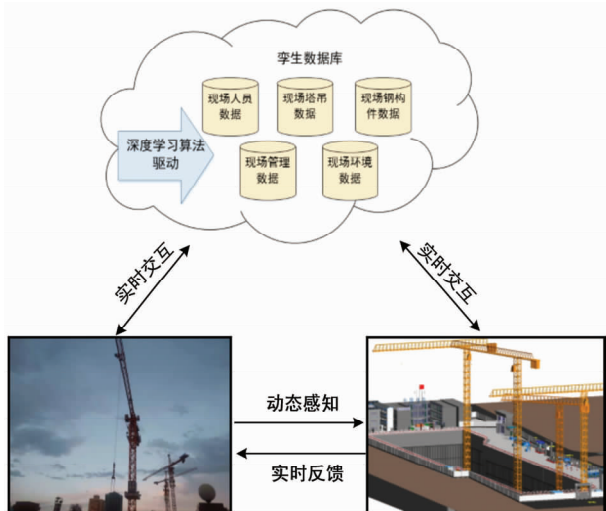


图5 虚实信息交互建模过程

通过建立该项目吊装过程数字孪生模型,以BIM软件为基础,利用BIM软件的API接口,对各部分建模技术进行集成,从而形成吊装过程安全管理平台,平台界面如图6所示,实时监测的吊装过程信息可在平台上进行可视化展示,并且实时反馈吊装安全风险预测结果,逐步形成吊装安全风险数据库,为后续的研究奠定坚实的基础。利用针对吊装过程数字孪生模型建立方法,大大提高了工作效率,切实保证了吊装过程的安全性。

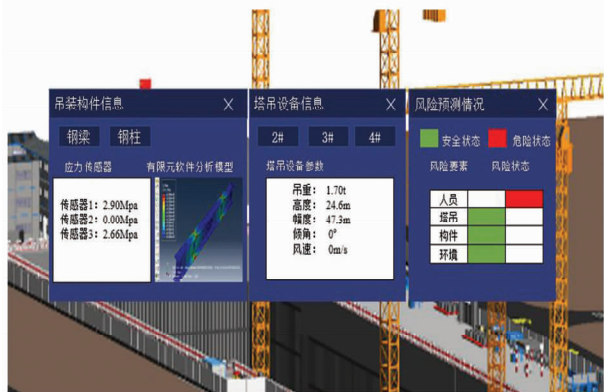


图6 吊装安全风险管理平台界面

4 总结与展望

本文基于现有安全管理方法存在智能化水平低、预测精确度无法保证等问题的现状。根据文献调研与工程实际,分析得到吊装安全风险诱发因素主要有人员因素、设备因素、构件因素、环境因素、管理因素,并在“人一机一料一法一环”的维度上提出了面向吊装过程安全风险管理的数字孪生框架,阐明了数字孪生模型运行机制,并提出了针对物理吊装过程、虚拟吊装过程、虚实信息交互三个部分的建模方法,为数字孪生实现全面感知、真实分析、实时控制、持续优化奠定了基础。最后将该方法应用于工程实际,验证了数字孪生建模方法的可行性,对推动智能建造与建筑工业化协同发展具有重要意义。但本文的数字孪生建模方法还存在一定的局限性,在后续的研究中,将会继续探究完善数字模型建立方法,最终形成一套完整的时空演化建模理论。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部,国家发展改革委,科技部,工业和信息化部,人力资源社会保障部,生态环境部,交通运输部,水利部,税务总局,市场监管总局,银保监会,铁路局,民航局. 关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见[EB/OL]. (2020-07-03) http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/202007/t20200728_246537.html.
- [2] 李文龙,李慧民,裴兴旺,等. 基于结构熵权-可信性测度理论的装配式建筑吊装施工安全风险评估[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(05): 410-417.
- [3] 荀志远,张丽敏,徐瑛莲,等. 基于组合赋权云模型的装配式建筑安全风险评价[J]. 数学的实践与认识,2020,50(7): 302-310.
- [4] Gabriel Raviv, Aviad Shapira, Barak Fishbain. AHP-based analysis of the risk potential of safety incidents: Case study of cranes in the construction industry[J]. Safety Science,2017,91.
- [5] 赵平,熊倩,汤彦宁. 基于SD的装配式建筑施工安全风险测量研究[A]. 中冶建筑研究总院有限公司. 2020年工业建筑学术交流会论文集(下册)[C]. 中冶建筑研究总院有限公司:工业建筑杂志社,2020,5.
- [6] 段永辉,周诗雨,郭一斌,等. 基于SEM的装配式建筑施工安全风险及策略[J]. 土木工程与管理学报,2020,37(2):70-75,121.

- [7] 申玲,唐晔文,牟月. 基于 Cloud - BN 的装配式住宅构件吊装安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 147-153.
- [8] Abel Pinto. QRAM a Qualitative Occupational Safety Risk Assessment Model for the Construction Industry that Incorporate Uncertainties by the Use of Fuzzy Sets[J]. Safety Science, 2014, 63.
- [9] 常春光,刘芷琦. 基于 RS - SVR 的装配式建筑施工安全风险预测[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2020, 22(6): 590-594.
- [10] 刘名强,李英攀,王芳,等. 基于 RVM 的装配式建筑吊装作业安全预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 109-114.
- [11] Melzner, Jurgen. Acquisition and processing of input data for an object-Oriented safety risk simulation in building construction [C]//2017 Winter Simulation Conference (WSC). 2017.
- [12] 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.
- [13] 刘占省,刘子圣,孙佳佳,等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 26-36.
- [14] 刘占省,张安山,王文思,等. 数字孪生驱动的冬奥场馆消防安全动态疏散方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 962-971.
- [15] Liu Zhansheng, Shi Guoliang, Zhang Anshan, et al. Intelligent Tensioning Method for Prestressed Cables Based on Digital Twins and Artificial Intelligence [J]. Sensors, 2020, 20(24).
- [16] 李强年,王乔乔. 基于 NB - IoT 技术的装配式建筑吊装安全风险[J]. 工程管理学报, 2020, 34(6): 113-118.
- [17] 陈伟,杨主张,熊威,等. 装配式建筑工程施工安全风险传导 DEMATEL - BN 模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 1-6.
- [18] 马辉,吕航,栾瑞斌. 基于空间单元分析的装配式建筑施工安全预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(5): 27-32.
- [19] 丁凯,张旭东,周光辉,等. 基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1491-1504.

Establishment Method of Digital Twin Model for Hoisting Safety Risk Management of Assembly Building

Liu Zhansheng, Li Anxiu, Meng Xintong, Shi Guoliang, Cao Cunfa

(Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Assembly building has been vigorously promoted due to its convenient construction and green environmental protection. As a key link in the construction process of prefabricated construction, hoisting operation involves many safety management elements and complex relationships. The current hoisting safety risk management methods still have problems such as low intelligence level, unguaranteed prediction accuracy, and unreal-time control of safety management factors. In view of the above hoisting safety risk management problems, this paper introduces the concept of digital twin into the field of hoisting safety risk management, analyzes the inducing factors of hoisting safety risk, builds a digital twin framework for hoisting safety management, and expounds the operation mechanism of digital twin model. And based on the key problem of digital twin modeling, the modeling methods of physical hoisting process, virtual hoisting process and virtual and real information interaction are proposed, which have been put into practice in a project to verify the effectiveness of the method, providing theoretical support and technical support for the application of digital twin in hoisting safety risk management.

Key Words: Assembly Buildings; Digital Twins; Hoisting Safety; Safety Management