

新一代建造质量安全管理发展研究

谢先启¹, 邓利明², 肖铭钊², 骆汉宾³, 房瑞伟^{4,5}

(1. 江汉大学湖北(武汉)爆炸与爆破技术研究院, 武汉 430056; 2. 武汉生态环境投资发展集团有限公司, 武汉 430023;
3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074; 4. 武汉市市政建设集团有限公司, 武汉 430023;
5. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 建筑工程施工是一个复杂的“人-机-环”系统工程, 施工过程中的质量安全管理仍面临诸多挑战, 在新一代信息技术的支持下, 数字孪生技术为解决工程质量安全问题、助力建筑业高质量发展、实现智能建造提供了新思路和技术手段。研究认为, 在工程建设中, 数字孪生技术的应用是以整个建造过程的可计算、可控制为目标, 通过先进感知、计算等技术与方法应用, 实现对实体工地的数字化管控。为此, 基于数字孪生技术在建造质量管理中的应用需求, 本文分析了数字孪生技术在工程质量安全管理方面的研究现状与存在问题, 提出了涵盖面向工程质量安全控制的产品智能设计、工程质量安全状态智能感知与分析、数据驱动的工程质量安全控制、工程质量治理与动态监管的新一代工程智能质量安全管理与控制体系, 从管理、技术、标准与规范 3 个方面提出了我国在工程建设中应用和发展数字孪生技术的对策建议。

关键词: 数字孪生; 质量安全; 智能建造; 智能感知与分析

中图分类号: TU7 **文献标识码:** A

New-Generation Quality and Safety Management of the Construction Industry

Xie Xianqi¹, Deng Liming², Xiao Mingzhao², Luo Hanbin³, Fang Ruiwei^{4,5}

(1. Hubei (Wuhan) Institute of Explosion Science and Blasting Technology, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;
2. Wuhan Ecology Investment Group Co., Ltd., Wuhan 430023, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430023, China; 5. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Construction is a complex human-machine-environment system, and the quality and safety management during construction faces numerous challenges. As the new-generation information technology develops, digital twin now can be used in construction to improve the quality and safety management and promote smart construction in China. Computability and controllability of the whole construction process is expected to be achieved using the digital twin technology; digital management of construction sites can be realized using advanced sensing, computing, and other technologies. In this article, we first investigate the demand for the application of digital twin into the construction quality management and analyze the research status and problems of the application. Subsequently, we propose a next-generation construction quality and safety management system that is composed of product intelligent design for construction quality and safety control, intelligent sensing and analysis of construction quality and safety status, data-driven

收稿日期: 2021-04-15; **修回日期:** 2021-06-05

通讯作者: 房瑞伟, 武汉市市政建设集团有限公司高级工程师, 研究方向为交通运输规划管理; E-mail: fangruiwei@whut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国建造高质量发展战略研究”(2020-ZD-09); 国家自然科学基金项目(71732001, 51978302, 51878311)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

construction quality and safety control, and construction quality management and dynamic supervision. Furthermore, we propose suggestions for the application of digital twin technology in the construction industry in China from the aspects of management, technology, as well as standards and specifications.

Keywords: digital twin; quality and safety; smart construction; intelligent sense and analysis

一、前言

“十三五”时期，建筑业在我国国民经济中的支柱作用不断增强，发展态势良好。工程施工是一个复杂的“人-机-环”系统工程，具有环境复杂、质量安全管理难度大等特征，以人工智能(AI)、数字孪生、物联网、区块链等为代表的数字技术已逐步在工程建造过程中获得应用 [1]。2020年，住房和城乡建设部等13个部门联合印发的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》提出，要以数字化、智能化升级为动力，创新突破相关核心技术，加大智能建造在工程建设各环节应用，提升工程质量安全水平。在工程建造产业中，以智能建造为主要手段、以技术创新为基础支撑的新型建造方式积极推动了建筑业的转型升级 [2]，促使全产业链的智能建造体系正在逐步成型；该体系覆盖从研发、规划设计、施工装配和运营的全过程，使产业的生产方式逐渐从粗放型、碎片化、劳动密集型向精细型、集成化和技术密集型转变。总之，智能建造交付的不仅仅是实体的工程，而是实现了实物产品与数字产品相互融合的复合产品 [3]。

当前，我国建筑业的发展多以粗放式发展为主，产业发展水平无法满足经济社会高质量发展的需求。建筑业工程质量安全作为建筑业发展的重要方面，面临诸多挑战，如社会公众对时有发生特大安全事故反响强烈，工程建设安全形势不容乐观。在安全事故发生率和伤亡人数方面，建筑业仅低于交通运输业；与世界其他主要国家和地区相比，我国在建筑业事故中的死亡人数自2005年以来始终位于前列，工程建设安全仍需不断加强 [4]。建设施工精细程度不足，房屋质量问题层出不穷，基础设施运营服务质量还有较大提升空间，尤其是无障碍设施存在建设不到位、管理不健全等现象。无障碍设施在各种行业场所中的普及率仅有40%，使用者对无障碍设施建设和运营的整体满意度不高 [5]。建筑业劳动力呈现老龄化趋势且数量有所下降，建

筑行业劳动力短缺问题突出。与制造业、服务业相比，建筑业工作条件差、薪酬吸引力低、从业稳定性和认同度低、劳动权益侵害率高、职业危险性高，导致建筑业新增就业人口占比逐年下降 [6]。因此，有必要开展智能建造发展战略研究，促进建筑业工业化和信息化协同发展，实现工程建造模式向集成化和精细型转变。

当前，基于数字孪生技术的建造质量安全管理研究仍处于初步阶段，相关研究集中在单一信息技术在特定质量安全管理问题中的应用；多数仅停留在建筑信息建模(BIM)应用 [7]、可视化视频监控 [8]等方面，尚未形成完善的理论体系，也未实现真正意义上的数字化、集成化、智慧化工地建设模式，关键技术瓶颈仍然存在。为此，本文分析当前数字孪生技术在建造质量安全问题上的研究现状，总结发展瓶颈与应用挑战并提出发展建议，以期工程质量安全管理提供理论参考。

二、数字孪生技术在建造质量安全管理中的应用需求分析

(一) 建筑业高质量发展的需要

数字孪生技术是实现建筑业信息化发展的支撑技术，通过虚拟环境反复试错和优化，完成高质量的设计和施工成果并以此完成高品质的建筑产品；在经营理念上，工程经营将逐步从传统的以产品为主、服务为辅向偏重服务型产品过渡，催生出新的业态和服务内容。与发达国家相比，我国建筑业科技创新起步较晚，亟需进一步增加创新驱动产业高速发展。重点发展和应用以AI、数字技术为代表的科技创新成果，使其成为支持我国从“建造大国”向“建造强国”迈进，实现高质量发展的重要保障。

(二) 建筑业智能建造技术发展的需要

智能建造在推动工程建造技术层面实现变革与

创新的同时,也将在产品形态、建造方法、经验理念、市场业态、行业规范等方面重建建筑业。智能建造的兴起,从根本上将质量安全管理“被动事后把关”转变为“主动过程控制”[1,2]。智能建造模式下的质量安全管理旨在构建信息(虚拟)空间与物理(实体)空间之间的闭环系统,实现施工过程的质量安全泛在感知、实时分析和智能控制。数字孪生技术在数字空间内综合各学科知识,对物理实体建立起多维度的动态虚拟模型,构建与物理实体具有相同属性、行为和规则的数字实体,被视为支撑智能建造的关键技术。在此基础上,采用AI、机器学习等技术进行模拟仿真,能够加强知识推理、动态传感与自主决策,进一步发展智能建造。

(三) 工程项目现场管理的需求

数字孪生技术是更好开展建筑工程项目现场管理的重要技术。建筑工程项目现场环境复杂多变,需要大量数据支持才能诊断工程质量安全状态。数字孪生体可以通过物理反馈获取外部数据,在数字空间(近)实时地反映物理实体的真实状态[9,10]。为此,应用数字孪生技术,数字化捕捉和复现工程现场人、机、料、环等实体状态及其行动轨迹,形成工程数字副本,便于信息在物理世界和数字世界之间的高效流动;随后通过算法分析、评价、诊断并预测现场质量安全发展态势,及时进行调整与纠偏。

三、基于数字孪生技术的工程质量安全管理研究现状

数字孪生技术作为虚实之间的双向映射,使二者实现动态交互和实时联系,是与物理系统对应的数字化表达[11]。面向制造业工程质量安全管理的数字孪生技术应用,旨在实现整个建造过程的可控与可计算,基于先进感知、仿真、计算等技术与方法,开展实体工地质量安全的数字化管控。基于数字孪生技术的工程质量安全管理,关键技术主要有工程智能感知、计算与分析方法,工程数字孪生技术。

(一) 工程智能感知、计算与分析方法的发展现状

智能建造作为一种在新技术驱动下涌现出来的

建造模式,促使工程建造表现为以全面数字化为典型特征的新模式。智能建造一方面可实现从工程设计到工程运营的建造全过程数字化,另一方面可实现建造产品的数字化,并由此生成视频、图片、监测、传感等类别的海量数据;对这些数据进行挖掘,获得有价值的信息和知识,从而进一步提升建造质量安全管理水平。

在工程智能感知方面,随着物联网、第五代移动通信(5G)、机器视觉等技术的发展,可用工程数据规模不断扩大,为建造领域数字孪生技术的应用提供了条件;先进的传感手段为工程建造质量安全管理提供了丰富的数据基础。构建面向建造质量安全管理的数字孪生需要海量数据支持,一方面在数字空间构建多维、多尺度的虚拟模型需要诸如建模对象属性、状态、行为、环境等数据,另一方面已构建的虚拟模型仍然需要借助工程实体的实时数据来更新模型。

在结构本体的智能监测方面,目前常用的高精度低功耗传感技术主要包括压电传感、光纤传感等,在结构监测中均有应用[12,13]。压电传感技术的优势是体积小、质量轻、稳定性高、传感灵敏度高、制作成本低,因而易于铺设在结构表面进行监测,主要用于施工现场等恶劣工程环境的智能监测;光纤传感技术具有系统集成性高、测量精度高、损耗率小、性能稳定、纤细轻巧、灵敏度高等优点,与结构匹配度高,不易受电磁、温度、腐蚀等条件影响,已在工程建造的长期监测方面获得广泛应用。

工程施工现场通常有大量工人和机械参与作业,传统管理手段难以有效遏制不安全行为和 unsafe 作业。AI技术可对相关作业进行实时监控,并对不安全作业行为施加干预;针对机械操作安全,分析视频和图像等传感数据,对存在视觉盲区的机械作业进行辅助指导。在研究工人行为和机械作业方面,已逐步采用传感设备、图像视频等方式,通过机器学习、机器视觉等智能方法来识别某些类别的不安全行为和作业[14],但仍缺乏全面获取各类不安全行为和作业数据的技术体系。

工地施工现场的智能感知技术的应用为建造质量安全管理提供了良好基础,更为重要的是对施工现场的不安全知识进行提炼,实时动态分析施工现场中的不安全状态,找出潜在的风险孕育机制与规律,为现场质量安全管理提供理论基础。在施工现

场安全状态的感知分析方面，主要通过机器学习、语义分析等智能手段挖掘提炼相关安全知识，集中在针对单个目标的识别和干预方面，而涉及多目标的研究较少，致使提炼的知识处于相对零散的状态，缺乏内在的有机联系（即缺乏质量安全管理知识体系）。因此，亟需开展针对复杂、动态施工环境的安全感知研究，从现行的标准、规范、方案中形成质量安全管理风险体系和关联规则；利用图像、视频等抽取施工现场的信息要素，对安全状态进行判断、预警和干预，实时动态分析施工现场中的不安全行为模式与规律，为现场安全管理提供技术保障。

（二）工程数字孪生技术应用的发展现状

当前，数字孪生技术主要运用在工程建造项目的运行维护阶段。针对建筑工程，建立楼宇数字孪生模型，提供监测楼宇能源和资源消耗的可视化平台；针对基础设施工程，如建立桥梁数字孪生模型，用于预应力混凝土桥梁损伤、安全水平的评估和实时监控，并开展相应的养护工作 [15]。也有研究尝试构建面向施工阶段的工程数字孪生模型以支持对应的管理决策，如通过构造数字孪生模型对筒仓类型、填充材料和位置等信息进行跟踪检测，对材料供应流程进行优化，采取基于阈值的补货策略从而避免施工现场的筒仓耗尽。另有研究提出构建面向个人的数字孪生模型，设计了信息驱动认知的个人数字孪生模型 [16]。

数字孪生模型的更新方式与频率是数字孪生技术应用的核心问题。为保证工程数字孪生模型能够反映物理对象的真实状态，需要对模型信息进行更新。尽管手动更新是最为直接的方式，但考虑到手动更新费时费力，主要采用传感器来采集数据并进行模型更新。当数据来源和种类较多时，需要采取混合更新策略，如城市灾害数字孪生模型的数据更新方式包括遥感、社会感知、众包数据等。实时更新的方式不一定适合所有场景，在部分场景反而会造成资源浪费，因此选择模型数据更新方式需要综合考虑技术和经济因素。

数字孪生技术对基于数据驱动的工程质量管理决策具有重要价值。数字孪生已在建模、信息物理融合等方面取得了一定进展，通过对项目全要素物理和功能特性的数字化表达，使得传统文件级数据管理转变为更为精细的构件级数据管理。

（三）存在的不足

基于数字孪生技术驱动的工程质量管理研究仍存在一些不足之处。首先，现有工作仅在技术层面对现场情况感知、数据建模等进行了研究，尚停留在 BIM 应用、可视化视频监控等方面，并未实现真正意义上的数字化、集成化、智慧化工地建设模式，也没有形成质量管控的成套体系。其次，面向智能化质量管理的产品-组织-过程 (POP) 模型也存在数据采集、检测、追溯体系不完全，未引入用户意见进行质量改进等一系列问题。因此，有必要建立新一代智能质量安全管理与控制体系，实现施工质量安全在线感知、实时分析和智能控制；同时，在工程要素的语义化建模与映射，数字孪生模型动态实时交互的信息物理融合，物理实体、虚拟模型和服务系统一体化等方面，应重点开展技术攻关。最后，数字模型精度与更新间隔之间的经济性有待深入研究。

四、新一代智能建造质量安全管理与控制体系

为了进行基于数字孪生技术的工程质量管理研究现状分析，本文以调查问卷和访谈的形式，邀请了来自政府管理机构（3.3%）、行业协会/学会（2.1%）、建设单位（20%）、设计企业（11%）、施工企业（60%）、监理企业（3.6%）等 100 个单位参与调研，共回收问卷 420 份。通过质性研究，对回收的问卷和访谈内容进行分析；同时借鉴美国、日本、新加坡、英国、德国等发达国家的建筑工程质量管理体系，邀请具有智能建造、质量安全、AI 等领域研究背景的专家学者，对智能工程质量安全管理与控制的发展格局及困境进行探讨；基于已有的 POP 模型、精益建造理论，5G、深度学习、区块链等技术 [17]，形成了基于数字孪生技术的新一代智能建造质量安全管理与控制体系。

新一代工程智能建造质量安全管理与控制体系（见图 1），利用数字孪生技术将“人、机、料、法、环”等工程要素虚拟化和参数化，利用智能算法实现智能化设计及工程质量安全状态智能感知与分析；据此进行工程质量安全治理与动态监管，实现人与系统之间、系统与平台之间、平台与设备之间

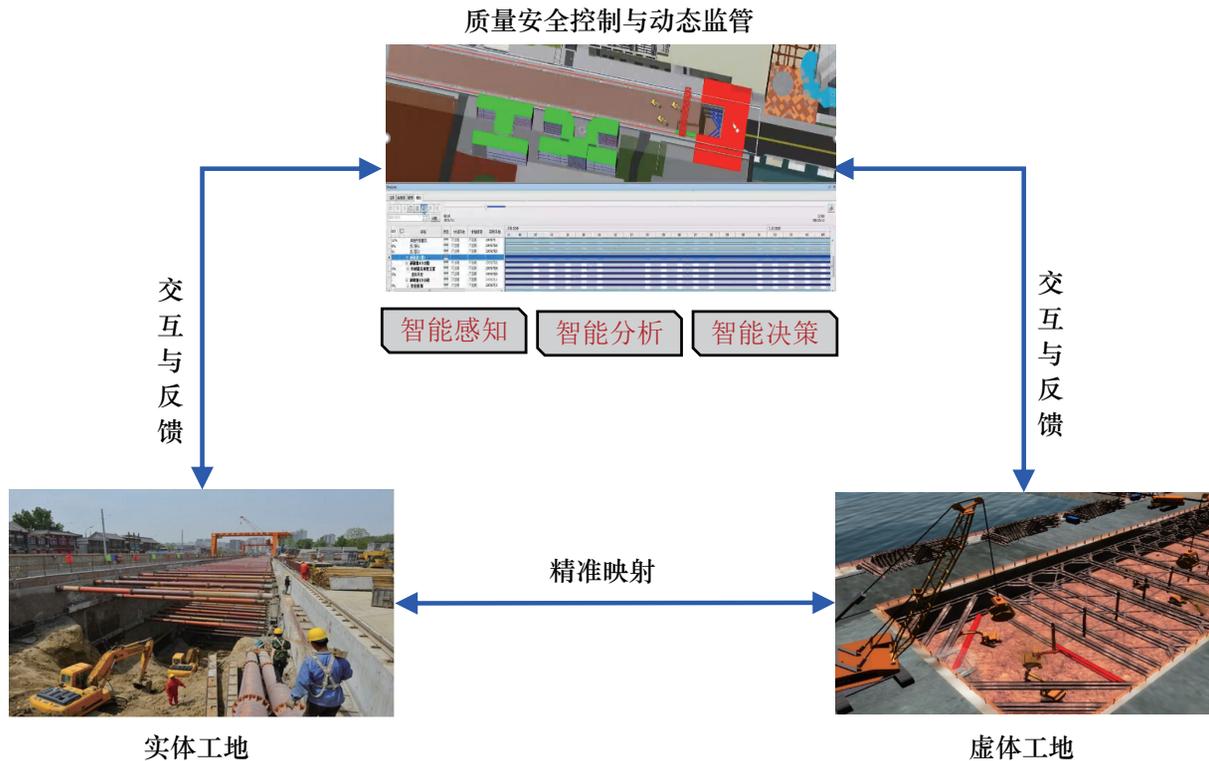


图 1 新一代工程智能建造质量安全管理与控制体系

的智能互联互通，实现面向施工质量安全的建造过程泛在感知、实时分析和智能控制。

(一) 面向质量安全控制的产品智能设计

1. 以质量安全为导向的智能设计

运用项目外部环境的数字孪生参数模型和设计方库数据，根据用户需求及偏好，结合项目特征、地理位置、地质情况、容积率等参数，针对项目质量与安全管理目标，实现智能建造设计，自动推算出符合要求的产品设计方案。

2. 用户有效参与设计

技术发展促进了创新形态转变，现阶段的设计理念更加重视以用户为中心。用户体验是用户对期望使用的产品、系统或服务的认知印象和回应，包括情感、信仰、喜好、认知等方面。传统工程质量管理以满足相关标准规程为目标，用户较少参与；在新技术条件下，应将用户使用体验作为检验工程产品质量可靠度的最终目标，这将是企业核心竞争力的体现。同时，将持续改进质量管理的理念融入到前端设计环节，充分考虑后续施工与使用环节的便利性和可靠性；将用户意见、反馈与需求纳

入设计需求，面向用户需求提供定制化的工程服务，为用户提供高质量的产品。

3. 产品质量持续改进

基于数字孪生技术条件，在工程建设之前，运用仿真镜像，通过数字化设计和仿真出完整的数字档案，包括产品结构、功能、材料、工艺流程等，实现工程安全质量追溯；在工程进行过程中，通过传感与监测技术，实现实体与虚体之间的相互投射与校核，捕捉工程偏差并进行及时纠偏；积累大量工程质量安全问题数据，形成质量安全通病库，对特定的工程建设项目进行质量安全风险评估，并在虚拟条件下进行调整与验证，根据工程建设进展进行持续的质量改进。

(二) 工程质量安全状态智能感知与分析

1. 面向工地安全的工程物联网网络布局

从“人-机-环”安全状态相互作用机理出发，在施工现场布置面向工程质量安全监控传感器，如视频监控、定位传感器、位移传感器等；集成 5G、传感网、云边协同计算方法，建立基于 5G 的智能工地安全物联网技术体系，实现对工程实体数据的

实时监控。

2. 工地泛场景下的施工安全状态智能感知与计算方法

利用机器视觉、传感器、深度学习等智能感知技术，采集施工过程中人的工作状态与位置、机械设备运行轨迹、场景环境状态实时数据，提取施工现场中“人-机-环”风险要素，识别人的不安全行为和物的不安全状态，进而对工程中可能产生的质量安全问题进行预测与干预。

3. 面向质量安全的工程数字孪生语义建模

分析主要工程要素数据的结构化语义表征，将数据中包含的语义特征进行分类和结构化编码，以便进一步的数据利用；将点云、图像、文本等不同类型的工程数据转化为跨模态的工程数字孪生动态模型，将离散的图像与点云代表的几何信息通过规范化、结构化的语义信息与自然描述语言相连接。通过从现场状态图像到数字语义表征的自动识别与转化，提高数据的可交互性与可操作性。

（三）数据驱动的工程质量安全控制

基于工程数字孪生语义模型，通过工程虚体模型对工程实体模型进行质量安全风险识别、预测与控制，可以实现工程虚体和工程实体之间的映射与深度交互。现场施工是一个复杂动态的过程，通过建立面向工程施工质量安全控制的数据体系结构和数据集成管理，模拟施工现场的工人、机械设备、环境等可能出现的不安全情况，分析引起工程质量的机理；从工人不安全行为、机械不安全状态、工程结构安全3个维度，开展数据驱动的施工现场质量安全管理控制。

（四）工程质量治理与动态监管

1. 基于区块链的工程质量可信大数据

在数字孪生环境下，构建覆盖建筑业的工程质量安全信息可信管理体系与平台，一致可靠地记录海量数据与信息。通过高效的数据采集和有效的信息整合，提升工程质量安全监管的针对性和有效性；通过建立数据的集体维护和共治机制，确保工程质量安全信息的公开、透明、不可篡改，进而形成工程质量安全监管的数据基础、丰富行业治理能力的手段。真实、准确、实时的数据，保障了建筑产品

在全员、全构件、全过程的质量可监管和可追溯，强化了工程质量安全责任事故的追责能力，支撑工程质量终身责任制的落实，进一步提升工程安全治理效能。

2. 基于诚信的动态评价

在数据公开、透明的条件下，运用数字孪生技术产生的各类工程质量安全动态数据，通过自动化整理与分类，形成责任主体诚信行为数据集，更好接受来自社会、政府机构、相关利益主体的监督。通过数据挖掘和机器学习，建立基于数据，具备科学性、可比性和可操作性的诚信动态评价体系，改善传统评价方法的主观性和滞后性；对市场主体的诚信状态进行实时的计算与排序，激发工程质量安全责任主体与个人的能动性，形成全社会广泛参与、基于诚信动态评价的建筑市场运作机制，保证工程建造的质量与安全。

3. 基于质量的激励机制

在公开透明的工程质量安全数据管理体系以及涵盖相应责任主体、岗位、个人的诚信动态评价体系基础上，运用基于质量的激励机制可以激发建筑业参与主体在提升质量安全水平与绩效方面的积极性。由政府主导形成基于最高诚信评价的评标机制，推动实施基于工程质量安全的奖励制度，使得诚信评价越高、质量安全表现越突出的主体能够获得更多收益。此外，在工程项目平台交易的场景下，采用基于主体动态评价的合作推荐机制，使工程质量安全绩效良好的建筑市场参与主体获得更多的交易推荐机会。

五、新一代建造安全管理与控制体系发展建议

（一）管理方面

1. 构建开放共享的工程建造质量安全信息环境

工程建造质量安全管理应建立在大数据的基础上，包括市政设施、企业经营等相关数据。构建开放、数据共享的工程建造质量安全信息环境，打破部门之间的数据壁垒，为工程质量安全信息的调取、分析与决策提供充分便利。整合多源异构信息，规范信息的存储与表达，推动数据共享，为信息化、数字化、智能化建造提供关键的基础支撑。

2. 建立透明的工程建造质量安全信用体系

工程建造质量安全事关国计民生，数字孪生技术打通了物理实景信息与数字虚拟场景之间的界限，网络系统也逐渐由封闭向开放转变。在新技术背景下，工程建设质量安全的责任主体也应建立健全工程建造质量安全信用体系，通过信用档案建设，将企业乃至个人与工程深度连接，形成责任信息链，促进企业内部及个人对工程建造质量的管理。

3. 打通建设管理业务的关键环节

将智能化的工程质量安全管控技术应用于相关管理部门的实际监管流程，保证信息及时性，减少人为操作。如在施工阶段，应用数字孪生技术进行质量验收数据的自动采集与导入、质量数据智能分析与业务流程审批，将虚拟模型代表的设计参数与施工产品代表的工程现状进行多尺度的符合性校验；在采集数据的同时进行同步验收，自动形成施工验收资料。运用数字孪生技术联通虚拟与现实，将施工现场数据与管理平台管理模块对接，减少重复手工劳动及中间环节，支持工程项目管理的提质增效。

（二）技术方面

1. 可操作性强的远程人机交互

数字孪生技术强调物理对象与虚拟对象之间的交互，可将目标系统的机构、机理、运行流程、状态、健康情况、变化趋势等状态动态映射到虚拟空间，使管理者与虚拟体之间可以沉浸式交互；与通信技术深度结合来实现远程操作，如可视化在线质量安全诊断、三维作业指导等，在新型冠状病毒肺炎疫情背景下可减少工程现场大量人员聚集带来的风险。

2. 集成数字化基础设施

借助数字孪生技术，对城市基础设施进行集成和数字化呈现，支持构建数字城市，实现城市管理智能化和运行有序化。可应用激光扫描、倾斜摄影、三维信息建模等技术，建立完整精确的城市建筑结构群、市政道路网、地下管网等模型。以地下管网为例，通过扫描得到模型部件的位置、尺寸和走向，录入管线的图形、属性、连接头等信息，建立地下管网的可视化系统。通过虚拟空间和城市实体的联动，指引和优化物理城市的交通管控、设施运维、

生态环境建设，协助处理突发事件及紧急情况，助力智能化、数字化城市建设。

3. 深度结合平行系统

平行系统和数字孪生技术是伴随着 AI 和物联网等技术发展起来的，皆通过数据驱动，与物理实体构建出虚拟系统并对此进行试验、分析、解析和优化。工程建造中的数字孪生建模，对开放环境的考虑较少，与环境单向交互的特点导致其对环境的感知落后于环境变化。而在平行系统中，通过应用智能体等方式将人员和环境在人工系统中进行建模，以实际系统在人工系统中的映射作为内在认知过程，不断改变内在认知信息以对社会环境产生反馈。建筑业领域除了应用数字孪生技术对建筑物进行实景仿真外，还需集成人员、机具、材料、方法、环境等多维信息，特别是人员行为对工程质量安全状态的影响；通过对参建个体特征、行为、交互机制的全面准确描述，构建整体复杂系统模型，研究复杂系统的演变规律，指导建筑建造过程。

（三）标准与规范方面

数字孪生技术应用的基础是规范与标准的模型语言表达。在数字孪生技术的发展过程中，统一的建模语言和方法至关重要。通过使用 UML、SYSML 等建模语言，建立面向对象开发、模型驱动开发的方法体系，将反映现实需求的系统转化为抽象模型。相较于通过简单代码堆叠构建的系统，抽象模型的集成性、交互性和扩展性均得到提升，显著提高了工作效率。

有关数字孪生技术的国际标准制定是未来发展的重点。国际标准化组织自动化系统与集成技术委员会（ISO/TC184）正在研究制定数字孪生构建原则、参考架构、物理制造元素的数字表示、可视化元素等的标准；信息技术标准化联合技术委员会数字孪生咨询组（ISO/IEC）在数字孪生术语、标准化技术需求、关键技术、参考模型等方面开展了研究。这些标准虽然还未发布，但我国需要更多参与数字孪生技术标准规范的制定，立足国情发布指导意见和规范。标准通用的数字孪生模型将进一步提升质量安全风险因素的自动识别与情景匹配的能力，改善现场质量安全的管理效率。

六、结语

随着 5G、深度学习、区块链等技术的发展,智能基础设施可在更广范围和更深层次上进行信息的物理交互,支持形成快速、高效、密集联结的“物联社会”。当前,数字孪生技术在智能建造领域的应用尚处于起步阶段,重要原因在于关键技术尚未完全突破、数据收集与处理不够完备、学科融合难度较大、技术标准尚未成熟。今后,数字孪生技术在建筑业的落地发展还需与质量安全管理实际需求相结合,探索数字孪生技术应用场景及应用实践,促进建筑业管理模式的改进升级。

数字孪生技术在制造业、电子信息产业得到了深入研究,随着数字化技术的进一步发展以及传感技术的日益成熟,对于建筑物理实体的精确全面感知、数字工程设施精确复现、基于 AI 和边缘计算的数据快速分析处理与可视化呈现,将是数字孪生技术未来重点研究与发展的方向。在智能建造需求的驱动下,数字孪生技术在建筑业中的应用前景良好;基于全要素、全过程视角,以智能建造为基础,以智慧城市为目标,充分体现创新是我国实现高质量发展的重要驱动力。

参考文献

- [1] 丁烈云. 赋能融合基建 助推行业转型 [J]. 中国勘察设计, 2020 (10): 15–18.
Ding L Y. Enabling integrated infrastructure to promote industry transformation [J]. China Engineering & Consulting, 2020 (10): 15–18.
- [2] 丁烈云. 赋能融合基建 发展新兴业态 [J]. 建筑, 2020 (19): 18–19.
Ding L Y. Empower and integrate infrastructure to develop emerging business formats [J]. Construction and Architecture, 2020 (19): 18–19.
- [3] Wu C, Zhou Y, Pessôa M, et al. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 79–93.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房城乡建设部关于 2017 年房屋市政工程生产安全事故情况的通报 [EB/OL]. (2018-03-08) [2021-04-12]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201803/t20180322_235474.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Announcement of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on the production safety accidents of housing and municipal engineering in 2017 [EB/OL]. (2018-03-08) [2021-04-12]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201803/t20180322_235474.html.
- [5] 中国消费者协会, 中国残疾人联合会. 2017 年百城无障碍设施调查体验报告 [EB/OL]. (2017-12-14) [2021-04-12]. <http://www.cca.org.cn/zxsd/detail/27796.html>.
China Consumers Association, China Disabled Persons' Federation. 2017 survey experience report of barrier-free facilities in cities [EB/OL]. (2017-12-14) [2021-04-12]. <http://www.cca.org.cn/zxsd/detail/27796.html>.
- [6] McKinsey & Company. The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem [EB/OL]. (2020-06-04) [2021-04-12]. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/The%20next%20normal%20in%20construction/The-next-normal-in-construction.pdf>.
- [7] Quirk D, Lanni J, Chauhan N. Digital twins: Answering the hard questions [J]. ASHRAE Journal, 2020, 62(8): 22–25.
- [8] Zhuang C, Miao T, Liu J, et al. The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 68: 1–18.
- [9] Tao F, Qi Q, Wang L, et al. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison [J]. Engineering, 2019, 5(4): 653–661.
- [10] Zhou J, Li P, Zhou Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1): 11–20.
- [11] Lu Y, Liu C, Wang K I, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 1–15.
- [12] Cha Y, You H. Torsion sensing based on patterned piezoelectric beams [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(3): 1–15.
- [13] 王莉, 吴桐. 基于光纤传感技术的混凝土结构深层裂缝监测研究 [J]. 激光杂志, 2020, 41(11): 193–197.
Wang L, Wu T. Study on the monitoring of deep crack of concrete structure based on fiber-optic sensing technology [J]. Laser Journal, 2020, 41(11): 193–197.
- [14] Fang W, Zhong B, Zhao N, et al. A deep learning-based approach for mitigating falls from height with computer vision: Convolutional neural network [J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 39: 170–177.
- [15] Shim C, Dang N, Lon S, et al. Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(10): 1319–1332.
- [16] Sun J, Tian Z, Fu Y, et al. Digital twins in human understanding: A deep learning-based method to recognize personality traits [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33: 1–14.
- [17] Chen L, Luo H. A BIM-based construction quality management model and its applications [J]. Automation in Construction, 2014, 46: 64–73.