

DOI: 10.7672/sjgs2024190001

# 智能建造系统架构与发展路径

张晋勋,殷明伦,欧阳海婴,王梓逸

(北京城建集团有限责任公司,北京 100088)

**[摘要]** 智能建造是建造技术与新一代信息技术相互融合、系统集成的建造模式。在产业生态和工程项目两个层面定义了智能建造,构建了涵盖智能设计、智能建造控制、智能生产、智能仓储物流、智能建造施工、智能建造验收等六大系统的智能建造系统架构,搭建了产业智能建造及项目智能建造系统,给出了智能建造技术的发展路径。发展智能建造技术,首先要发展具备统一嵌入接口规则的智能建造体系架构和基础平台系统,同时多元深度发展平台系统的单元技术,最终形成多样化智能建造技术系统。

**[关键词]** 智能建造;系统架构;产业生态;发展路径

**[中图分类号]** TU741

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2024)19-0001-07

## System Architecture and Development Pathway of Intelligent Construction

ZHANG Jinxun, YIN Minglun, OUYANG Haiying, WANG Ziyi

(Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** Intelligent construction is a building model that integrates construction technology with the system integration of new generation information technology. This paper defines intelligent construction at both the industrial ecosystem and engineering project levels, establishing an intelligent construction system architecture encompassing six major systems, such as intelligent design, intelligent construction control, intelligent manufacturing, intelligent warehousing and logistics, intelligent construction execution, and intelligent construction acceptance. It also constructs systems for industrial intelligent construction and project-level intelligent construction, outlining a development pathway for intelligent construction technologies. To advance intelligent construction technology, the primary focus should be on developing an intelligent construction system architecture and foundational platform with unified embedded interface protocols. Concurrently, efforts must be made to diversify and deeply develop the constituent technologies within the platform system. This multifaceted approach will ultimately lead to the formation of a versatile and diverse system of intelligent construction technologies.

**Keywords:** intelligent construction; system architecture; industrial ecosystem; development pathways

### 0 引言

建筑业经过持续快速发展,产业规模不断扩大,建造能力不断增强。但建筑业工业化、信息化水平较低,生产方式粗放、劳动效率不高、能源资源消耗较大、科技创新能力不足等问题尤为突出,迫切需要推动智能建造与建筑工业化协同发展。《中华人民共和国国民经济与社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》要求“发展智能建造,推广绿色建材、装配式建筑和钢结构住宅,建设

低碳城市”,这是建筑业的重点发展方向。

制造业与建筑业相同,都是传统行业,以数字化、网络化、智能化为特点的新一代信息技术推动了其发生深刻变革,制造业由传统制造业向智能制造发展转型的过程可以给建筑业转型以启发。周济等<sup>[1-4]</sup>提出智能制造是“中国制造 2025”主攻方向,构建了新一代的人-信息-物理智能制造系统(HCPS),揭示了智能制造的技术机理,搭建了智能制造的技术体系。伴随着信息技术的发展,制造业已历经了由传统制造向数字化制造和数字化、网络化制造的转型,并正在向数字化、网络化、智能化制造演进,而建筑业的数字化、网络化起步较晚,发展

智能建造任重而道远。

1 智能建造系统定义

研究智能建造,首先将智能建造从产业生态和工程项目两个层面进行定义。

智能建造产业生态系统指的是整个行业全链条下的智能建造。从建筑业整个产业出发,以工业化、模块化、协同化的建造技术为主体技术,以数字化、网络化、智能化的新一代信息技术为赋能技术,两者相互融合、系统集成,最终形成集工程设计、构配件生产、施工、运维为一体的全生命周期的智能建造体系。

工程项目智能建造系统指的是工程项目施工中的智能建造。施工中的人、机、料、法、环,人是最重要的,既是大脑,也是操作手,也是几个要素的驱动要素。智能施工的本质就是降低人的参与度,生产物化的过程数字化、网络化、智能化,提高施工效率,降低建造成本,减少劳动力投入,达到提升管理效能、质量安全、效益品质的目标。

在工程全生命周期中,智能建造产业生态系统涵盖从设计、施工到运维的全过程,而工程项目智能建造系统则主要关注项目施工阶段。智能建造产业生态系统强调的是在整个工程周期内,通过数字化、网络化、智能化技术,在产业社会角度提高要素在各工程参与方之间流转的效率,降低风险与成本。而智能建造系统则侧重于提高工程项目建造的效率,主要包含施工设计、项目建造及项目验收等环节。

智能建造产业生态系统与智能建造系统之间是包含与被包含的关系,如图 1 所示。智能建造产业生态系统包含智能建造系统,即智能建造系统是智能建造产业生态系统的核心部分、场内部分。同时,智能建造系统也依赖于智能建造产业生态系统的基础和技术支持。

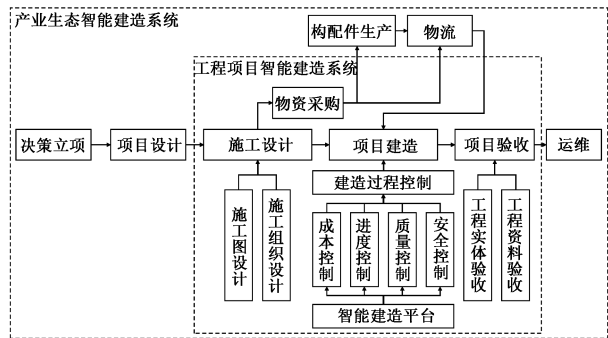


图 1 智能建造系统范围定义

Fig. 1 Definition of scope for intelligent construction system

2 智能建造现状与发展趋势

部分发达国家围绕建筑业发展出台了各种政策。美国在 2007 年时就规定所有重要工程项目都要使用 BIM 技术,通过使用信息技术实现低碳绿色发展,并在 2017 年发布了重点关注建造过程的《美国基础设施重建战略规划》;新加坡出台相关政策在建筑企业中推广 BIM 应用,提升建筑业信息化水平;英国推出了“Construction 2025”战略,提升 BIM 的应用程度,增加装配式建筑比例,推广云计算、VR/AR/MR、无人机、3D 打印、大数据分析、人工智能、机器人等新技术的应用,提出到 2025 年,将工程全生命周期成本降低 33%,进度加快 50%,温室气体排放减少 50%,建造出口增加 50%;日本制定了“i-Construction”战略,主要涉及测量、设计、施工以及检查领域 ICT 技术的全面使用、规格的标准化、施工周期的标准化三部分内容;德国在工业 4.0 的背景下大力推进建筑业数字化升级,发布了《数字化设计与建造发展路线图》,在建筑领域促进工业化与信息化的深度融合,对数字设计、施工和运营的变革路径进行了描述,目的是在德国联邦运输和数字基础设施部所辖领域逐步采用 BIM 技术,持续提高工程设计精确度和成本确定性,不断优化工程全生命周期成本绩效。从以上具有代表性的各个国家的发展趋势来看,智能建造已逐渐成为建筑业发展的大势所趋。

我国为推动建筑业转型升级、促进建筑业高质量发展,住房和城乡建设部先后发布了《2011—2015 年建筑业信息化发展纲要》《关于推进建筑信息模型应用的指导意见》和《2016—2020 年建筑业信息化发展纲要》等文件,要求建筑业企业对大数据、云计算、物联网、3D 打印以及智能化等技术进行应用;2020 年 7 月,住建部等多个部门颁发《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》,明确提出推进建筑工业化、数字化、智能化升级的目标;2021 年,中共中央、国务院发布《国家标准化发展纲要》,住房和城乡建设部先后发布了《智能建造与新型建筑工业化协同发展可复制经验做法清单(第一批)》及《智能建造新技术新产品创新服务典型案例(第一批)》,分享了全国围绕数字设计、智能生产、智能施工等方面的积极探索;2022 年 1 月,住房和城乡建设部发布的《“十四五”建筑业发展规划》中提出,到 2025 年,初步形成建筑业高质量发展体系框架,建筑工业化、数字化、智能化水平大幅提升,建造方式绿色转型成效显著,加速建筑业由大向强转变;2022 年 10 月,住房和城乡建设部选取

北京等 24 个城市开展智能建造试点,为期 3 年,积极探索建筑业转型发展的新路径,随后各地积极发展智能建造,并给出了相应方案。

国内学者对智能建造领域已经开展了研究并取得部分成果。钱七虎<sup>[5]</sup>将智慧建造发展归纳为 3 个方面:首先是全面透彻的感知系统;其次是物联网、互联网全面互联,实现数据的高速实时传输;最后是智慧平台的打造,实现海量数据的分析、处理、决策。肖绪文等<sup>[6-7]</sup>认为,智能建造是通过计算机技术、网络技术、机械电子技术、建造技术与管理科学的交叉融合,促使建造及施工过程实现数字化设计、机器人主导或辅助施工的工程建设方式,推进智能建造应该着重从构建工程建设信息模型(简称 EIM)管控平台、数字化协同设计、机器人施工 3 个重点内容着手。丁烈云及其团队<sup>[8-13]</sup>构建了基于以“三化”“三算”为特征的新一代信息技术的智能建造体系,发展面向全产业链一体化的工程软件、面向智能工地的工程物联网、面向人机共融的智能化工程机械、面向智能决策的工程大数据等领域技术,支持工程建造全过程、全要素、全参与方协同和产业转型。毛志兵<sup>[14-15]</sup>对智慧建造的定义是在设计和施工建造过程中,采用现代先进技术手段,通过人机交互、感知、决策、执行和反馈提高品质和效率的工程活动。他从技术和管理两个层面剖析了智慧工地的特征,按照人工智能技术的发展轨迹,将智慧工地划分为感知、替代、智慧 3 个阶段,按大数据的积累程度,将智慧工地划分为初级、中级、高级 3 个阶段。毛超等<sup>[16]</sup>将智能建造定义为利用新一代信息技术的融合,对传统建设活动及流程的智慧化升级,涉及智能决策、智能设计、智能生产、智能施工和智能运维五阶段的全链条活动,其核心逻辑是通过 BIM 模型迭代和 BOM 的数据统一、依赖数据驱动的全链条活动信息集成和业务协同逻辑。Stefanic 等<sup>[17]</sup>所探讨的智能建造主要在施工阶段,分析了物联网、人工智能和云计算等技术在建筑监控、施工现场管理、工作安全、灾害预警等智能建造领域的应用。目前行业内对智能建造的定义有各自不同的侧重和理解,尚未达成统一认识。

经过近 10 年的发展,我国在智能建造领域取得了一系列成果。目前关于智能建造的研究大部分是以具体应用点为主,在智能建造理论、技术体系框架、关键技术等方面还没有形成整体的系统认识或基本体系,尚未提出清晰、具体的发展路径。由于缺少统一的顶层设计,智能建造技术研发呈现碎片化特点,适用于智能建造的新技术、新材料、新工

艺、新设备的研发推广难以实现协同化,造成技术应用无法形成合力,亟需构建完备的智能建造整体框架、明确技术发展路径,为发展智能建造技术提供基础条件。本文设计了智能建造系统架构,搭建了智能建造系统场景,以期建立智能建造的基础体系。

3 智能建造系统架构

3.1 智能建造系统架构设计

智能建造系统是将标准化、装配化、协同化的建造技术与数字化、网络化、智能化的信息技术深度融合,贯穿设计、生产、施工、运维等全生命周期各个环节的优化集成系统。

智能建造系统架构需对系统基本组成、系统业务流程、(子)系统基本功能等进行设计。智能建造系统主要由六大系统组成,即智能设计系统、智能建造控制系统、智能生产系统、智能仓储物流系统、智能建造施工系统、智能建造验收系统,如图 2 所示。其中智能设计系统、智能生产系统与智能仓储物流系统构成产业生态智能建造系统,智能建造控制系统、智能建造施工系统与智能建造验收构成工程项目智能建造系统。

本文从工程总承包项目视角,设计智能建造控制系统、智能生产系统、智能建造施工系统以及智能建造验收系统的业务流程,给出系统及其各子系统的基础功能要求,并分析智能建造标准体系构成。

3.1.1 智能建造控制系统

智能建造控制系统包括施工设计子系统、物资采购子系统、场景搭建子系统、建造控制子系统、工程验收子系统 5 个方面。

1) 施工设计子系统是将设计文件转化为工程建设方法的系统。施工设计子系统接收智能设计系统产出的标准格式成果,经设计优化、智能建造施工组织设计等处理后流转至物资采购子系统及场景搭建子系统;同时可接收场景搭建子系统的工程反馈进一步深化设计,实现“施工设计-场景搭建”的信息双向流转。该系统需具备设计优化、施工图深化设计、施工组织设计等基本功能。

2) 物资采购子系统是将施工设计子系统形成的数字化成果分析处理,生成物资采购清单,并将对应任务发包至智能生产系统及智能仓储与物流系统,同时将采购信息流转至场景搭建子系统。该系统需具备设计成果分析处理、物资周转规划、采购任务发包等基本功能。

3) 场景搭建子系统,即数字孪生系统,是在系统中搭建可实时映射工程实体的数字孪生体,实现

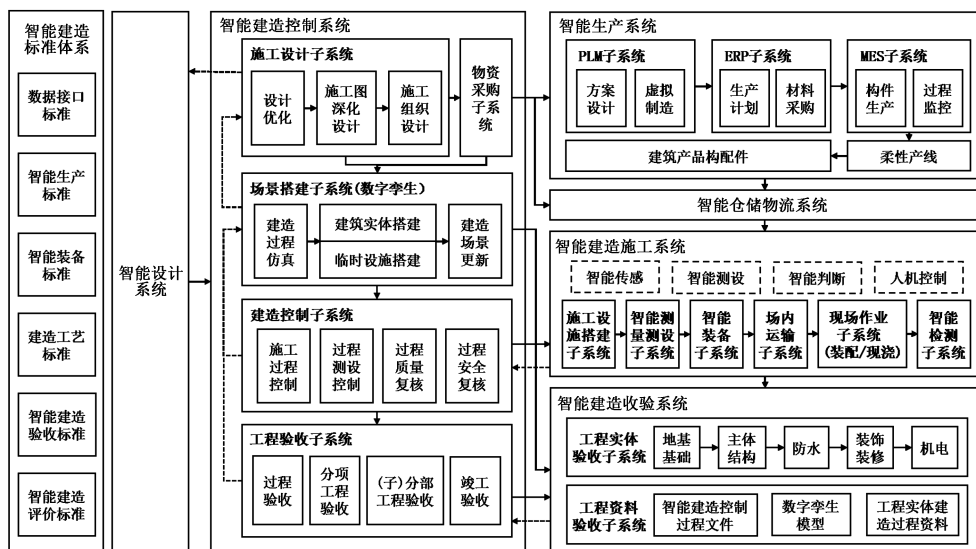


图 2 智能建造系统架构

Fig. 2 Architecture of intelligent construction system

工程建设过程推演与虚实转换映射控制的平台。场景搭建子系统接收经施工设计子系统、物资采购子系统处理后产出的标准格式成果,搭建工程项目的数字孪生体;产出数字孪生模型等数字资料,流转至智能建造验收系统,完成工程验收;同时可接收建造控制子系统及工程验收子系统的工程反馈,实时反映现场工程建造情况。该系统需具备建造过程仿真、建筑实体搭建、施工设施搭建、建造场景更新等基本功能。

4) 建造控制子系统是将场景搭建子系统系统中的数字孪生体投射到实体工程中的具体工具,是实现工程项目精准建造的核心。建造控制子系统接收场景搭建子系统产出的标准格式成果,形成控制工程现场实体作业的命令流并流转至智能建造施工系统,实时精准控制现场工程建造;生成智能建造控制过程数据,流转至工程验收子系统;基于智能传感技术,接收智能建造施工系统的实时反馈,将工程现场数据传回至场景搭建子系统,完成建造场景虚实转换更新。该系统需具备施工过程控制、过程测设控制、过程质量复核、过程安全复核等基本功能。

5) 工程验收子系统是实现工程建造全过程验收最终交付的平台。工程验收子系统接收建造控制子系统形成的建造控制过程数据,实现完成控制智能建造验收交付。该系统需具备分部分项工程验收、竣工验收、交付等基本功能。

### 3.1.2 智能生产系统

智能生产系统包括产品生命周期管理(PLM)子系统、企业资源计划(ERP)子系统、制造执行

(MES)子系统 3 个子系统,搭建柔性生产线,实现建筑产品构配件的柔性生产。

产品生命周期管理(PLM)子系统、企业资源计划(ERP)子系统与制造执行(MES)子系统是智能生产系统信息化的基础。PLM 子系统是工艺过程的数字化定义,ERP 子系统是业务流程的数字化定义,MES 子系统是数据格式与数据接口的数字化定义。智能生产系统实现方案设计、虚拟制造、生产计划、材料采购、构件生产、过程监控的全过程数字化,辅以柔性化工装、智能工业机器人、智能化测量与检测,构成建筑产品构配件的柔性生产线。

### 3.1.3 智能建造施工系统

智能建造施工系统包括施工设施搭建子系统、智能测量测设子系统、智能装备子系统、场内运输子系统、现场作业子系统、智能检测子系统等多个部分。

智能建造施工系统的产出成果是工程项目建造的实体,系统的运行依托于智能建造控制系统的精准控制。智能建造施工系统受其建造控制子系统的控制,基于智能传感、智能测设、智能判断、人机控制等技术,由其不同的子系统接收命令流并实现工程项目精准施工;其产出成果为工程项目实体,流转至智能建造验收系统中完成工程验收;同时该系统也是将工程建造过程与工程实体数字化的过程,将现场情况以标准格式的数字化成果向建造控制子系统实时反馈。智能建造施工系统是一个庞大复杂的综合性平台,依据不同类型工程的特点,应设有不同的子系统,以控制工程实体的建设,通常情况下需具备施工设施搭建、智能测量测设、

智能装备设置、物料场内运输、现场机械化作业(装配)、智能检测等基本功能。

3.1.4 智能建造验收系统

智能建造验收系统包括工程实体验收子系统、工程资料验收子系统两个子系统,是实现工程实体验收的平台。

智能建造验收系统是整个智能建造业务流程的末端,是涉及多方参与的交互型平台。该系统接收智能建造施工系统产出的工程实体及其建造过程资料,以及智能建造控制系统中的工程验收子系统产出的智能建造控制过程文件、场景搭建子系统产出的数字孪生模型等工程资料;工程实体验收涉及地基基础、主体结构、防水、装饰装修、机电等工程实体建造全过程,最终将验收通过的工程实体、工程数据等有形与无形的产品交付。该系统需具备组织验收、资料核验、标准化产品输出等基本功能。

3.1.5 智能建造标准体系

围绕着六大核心系统,建立涵盖数据接口标准、智能生产标准、智能装备标准、建造工艺标准、智能建造验收标准、智能建造评价标准的智能建造标准体系,完整构建覆盖产业生态与工程项目的智能建造系统及其体系架构。其中,行业统一的数据接口标准是智能建造系统搭建的基础,包括设计成果交付数据标准、设计与生产一体化数据衔接标准、施工(安全)监控数据标准、检测数据标准、运维数据标准、智能算法模型训练数据标准等。行业统一的数据接口标准需适配不同的具体工程类型,符合国家现行相关标准规范、兼容国内外主流交换格式、明确数据结构保证其完整性,工程各参与方将工程要素信息系统集成、高效整合,为智能建造系统的感知、分析、决策、控制提供基础支持。

3.2 智能建造系统搭建

智能建造产业生态系统是一项庞大复杂的工程,是多系统之间基于新一代数字化、网络化技术的集成,系统模块间采用统一的信息交换标准,不

同的系统模块独立发展。

智能建造产业生态系统的发展需要产业链上下游资源协同整合,各参与方之间的深度协作与创新,构建一个涵盖多种类工程项目的决策立项、勘察设计咨询、生产、物流、施工、运维等全生命周期的数字化、网络化、智能化、协同化环境,如图 3 所示。

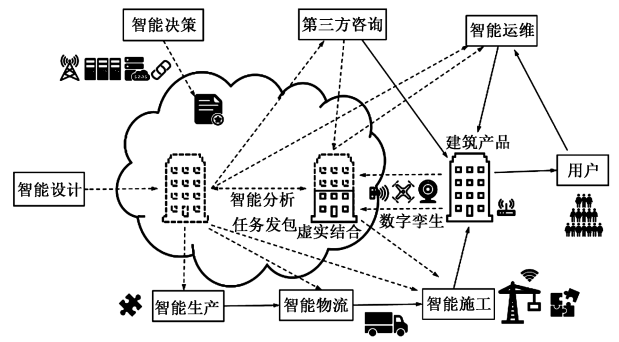


图 3 智能建造产业生态系统

Fig. 3 Intelligent construction industry ecosystem

工程项目智能建造系统是一种将信息技术、物联网技术、人工智能等技术深度融合的施工现场管理体系。它以信息化平台为基础,通过智能设备、传感器等硬件设施实时采集施工现场的数据,再通过人工智能技术对数据进行处理和分析,为管理人员提供决策支持。

工程项目智能建造系统主要涵盖部署、施工与校核、验收交付,其逻辑框架如图 4 所示。工程项目智能建造系统起始于设计文件,于工程交付后终止。其中智能部署包括施工图设计、智能建造施工组织设计、智能场景搭建等方面;施工与校核包括物资采购、预制构件生产、仓储物流、物料场内运输、施工设施搭建、建筑实体搭建、智能建造场景更新、安全质量复核等方面;验收交付包括材料设备进场验收、分部分项工程验收、竣工验收及工程交付等方面。工程项目智能建造系统搭建需要各环节具备统一的数据交换标准,在 5G、大数据、物联网、云计算等技术的支撑下,实现工程项目的数字化、网络化,推动系统中各技

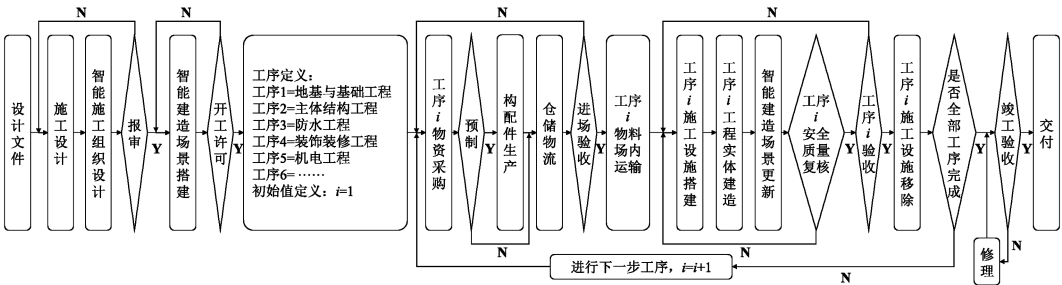


图 4 工程项目智能建造系统

Fig. 4 Intelligent construction system of engineering project

术模块向智能化方向发展。

4 智能建造技术发展路径

智能建造技术包括建造技术和赋能技术,如图 5 所示。建造技术主要向标准化、装配化、协同化发展方向,赋能技术主要向数字化、网络化、智能化等发展方向,每个方向由具体建造技术与信息技术组成,多个具体技术的进步共同推动智能建造技术的发展。建造技术和赋能技术之间存在密切的联系和互动,融合,系统集成创新,形成智能建造体系。

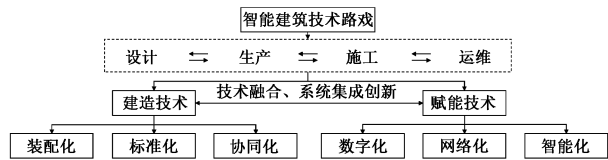


图 5 智能建造技术路径

Fig. 5 Technologies pathway of intelligent construction

4.1 建造技术

建造技术是智能建造的主体技术,建造技术的装配化、标准化、协同化发展是根本性的。发展与赋能技术更好融合的建造技术,是对传统工程建造方式进行革新升级,实现建筑从设计、生产、施工到运维全生命周期的数字化、智能化。

4.1.1 装配化

装配式建筑是建筑工业化和建筑信息化深度融合的产物。为了达到施工现场绿色环保节能要求和建筑使用中易更新维护的目标,发展易拆卸装配工艺,各项施工工艺从湿式体系逐渐向干式体系转变,连接技术由热连接向冷连接发展,最终实现建筑可装配、可拆解移除、易更新维护。智能建造施工系统中嵌入冷连接装配式技术等适用于智能建造的建造技术模块,不同技术模块独立发展,开发各类装配式工艺、设备、技术。

4.1.2 标准化

产品标准化是建筑业工业化的基础,其目的是合理利用原材料,促进构配件的通用性和互换性。这就要求建立完善的行业标准化体系,各类部品部件接口统一参数,从而实现产品的通用化、系列化。基于智能生产系统,打造标准化构件的柔性生产线,实现各类标准化预制构件生产,推动行业向信息化和工业化融合的方向发展。

4.1.3 协同化

智能建造系统是实现设计、生产、施工等各专业间高效协同的基础。基于统一标准的数据接口,产业链数据流转畅通,显著提升效率;通过智能建造控制系统对工程建造过程精准控制,实现不同专

业、工序间的高效协同;基于智能建造施工系统,实时收集施工现场的数据,动态调整施工计划,实现最优资源配置;工程验收环节中,工程实体与过程数据共同交付确保数据的一致性和协同性,减少工程建设各阶段衔接及各参与方之间的信息丢失。

4.2 赋能技术

对于智能建造而言,新一代数字化、网络化、智能化信息技术是共性赋能技术。它可以与各种建造技术深度融合,是推进建筑业转型升级的核心驱动力。应用数字化、网络化、智能化等先进信息技术对建造系统“赋能”,并与建造技术深度融合,形成智能建造技术,使建造系统创新升级。

4.2.1 数字化

数字孪生技术是智能建造系统中的核心,它集成数字传感技术、物联网技术、数字软件技术,在虚拟空间中完成真实环境下建筑实体搭建、施工设施搭建等过程全生命周期的映射。智能建造系统中的数字化体现在建筑设计数字化、智能建造控制、工程实体数字化。在智能建造验收系统中,不仅需要验收工程实体与工程建造过程文件,还需要验收其数字化成果:数字孪生模型与智能建造控制过程资料。

4.2.2 网络化

5G 技术是实现智能建造系统、子系统之间海量数据高速、低延迟传输的环境基础,实现不同系统间的集成融合。在 5G、大数据、网络安全、云计算等技术的支撑下,信息技术与建造技术深度融合形成工程项目智能建造系统与产业生态智能建造系统,实现工程项目中数据流转及产业内数据流通,智能建造系统是建造技术网络化赋能的核心载体。

4.2.3 智能化

智能化是智能建造系统中各系统、子系统模块发展的方向。智能化是指利用先进数字传感技术、物联网技术、大数据分析以及人工智能算法等手段对建筑施工环境、工程进度、结构健康、人员行为、设备状态等信息进行实时监测和智能理解的过程。系统、子系统的智能化能够提供即时的数据反馈,辅助监控和预警。智能建造系统也可将各类传感数据整合,进而结合人工智能技术进行数据挖掘和模式识别,为预测、优化和管理决策提供依据。

5 结语

本文提出了智能建造在产业生态和工程项目层面的定义,设计了智能建造系统架构,搭建了智能建造系统场景,给出智能建造技术的发展路径。

1) 构建完备的智能建造系统架构、明确技术发展路径是智能建造产业发展的必要前提。

2)设计了智能设计系统、智能建造管理系统、智能生产系统、智能仓储物流系统、智能建造施工系统、智能建造验收系统等六大系统组成的智能建造系统架构,明确了系统及其各子系统的基础功能要求。建立了以行业统一的数据接口标准为基础的智能建造标准体系,完整构建了覆盖产业生态与工程项目的智能建造系统应用场景。

3)智能建造系统是先进建造技术与新一代信息技术的深度融合,贯穿建筑全生命周期各个环节的优化集成的系统。建造技术是智能建造的主体技术,是智能建造的根本,其技术发展方向为装配化、标准化、协同化;新一代信息技术是与各种建造技术深度融合的共性赋能技术,是推进建筑业转型升级的核心驱动力,其技术发展方向是数字化、网络化、智能化。

发展智能建造技术,首先要发展统一的智能建造体系架构和基础平台系统,确立体系架构和基础平台系统的接口嵌入规则。同时需要体系架构各单元和平台系统单元技术的多元深度发展,最终形成多样化智能建造技术系统。

参考文献:

[ 1 ] ZHOU J, ZHOU Y H, WANG B C, et al. Human-cyber-physical systems ( HCPS ) in the context of new-generation intelligent manufacturing[ J]. Engineering, 2019, 5( 4 ) : 71-97.

[ 2 ] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[ J]. Engineering, 2018, 4( 1 ) : 28-47.

[ 3 ] 周济,李培根. 智能制造导论[ M]. 北京:高等教育出版社, 2021.

ZHOU J, LI P G. Introduction to intelligent manufacturing[ M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.

[ 4 ] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[ J]. 中国机械工程, 2015, 26( 17 ) : 2273-2284.

ZHOU J. Intelligent manufacturing——main direction of “made in China 2025” [ J]. China mechanical engineering, 2015, 26( 17 ) : 2273-2284.

[ 5 ] 钱七虎. 工程建设领域要向智慧建造迈进[ J]. 建筑, 2020( 18 ) : 17-18.

QIAN Q H. Engineering construction needs to advance towards smart construction [ J]. Construction and architecture, 2020( 18 ) : 17-18.

[ 6 ] 肖绪文. 智能建造:是什么、为什么、做什么、怎么做[ J]. 施工企业管理, 2022( 12 ) : 29-31.

XIAO X W. Intelligent construction: What, why, what to do, and how to do it[ J]. Construction enterprise management, 2022( 12 ) : 29-31.

[ 7 ] 肖绪文, 曹志伟, 刘星, 等. 我国建筑装配化发展的现状、问题与对策[ J]. 建筑结构, 2019, 49( 19 ) : 1-4.

XIAO X W, CAO Z W, LIU X, et al. Status, problems and

countermeasures of prefabricated buildings in China [ J]. Building structure, 2019, 49( 19 ) : 1-4.

[ 8 ] 陈珂, 丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[ J]. 中国工程科学, 2021, 23( 4 ) : 64-70.

CHEN K, DING L Y. Development of key domain-relevant technologies for smart construction in China[ J]. Strategic study of CAE, 2021, 23( 4 ) : 64-70.

[ 9 ] 陈兴海, 丁烈云. 基于物联网和 BIM 的城市生命线运维管理研究[ J]. 中国工程科学, 2014, 16( 10 ) : 89-93.

CHEN X H, DING L Y. Research on operations management based on the internet of things and BIM of urban lifeline[ J]. Strategic study of CAE, 2014, 16( 10 ) : 89-93.

[ 10 ] 丁烈云. 数字建造导论[ M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.

DING L Y. Digital construction introduction [ M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[ 11 ] 丁烈云. 面向数字经济的复合型人才培养探讨[ J]. 高等工程教育研究, 2022( 6 ) : 1-4.

DING L Y. Discussion on the cultivation of compound emerging engineering education talents oriented to digital economy [ J]. Research in higher education of engineering, 2022( 6 ) : 1-4.

[ 12 ] 丁烈云. 智能建造创新型工程科技人才培养的思考[ J]. 高等工程教育研究, 2019( 5 ) : 1-4.

DING L Y. System thinking on cultivation mode for innovative intelligent construction talents[ J]. Research in higher education of engineering, 2019( 5 ) : 1-4.

[ 13 ] 丁烈云, 徐捷, 覃亚伟. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述[ J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32( 3 ) : 1-10.

DING L Y, XU J, QIN Y W. Research and application review of the digital construction technology of 3D printing for construction [ J]. Journal of civil engineering and management, 2015, 32( 3 ) : 1-10.

[ 14 ] 毛志兵. 智慧建造决定建筑业的未来[ J]. 建筑, 2019( 16 ) : 22-24.

MAO Z B. Intelligent construction determines the future of the construction industry [ J]. Construction and architecture, 2019( 16 ) : 22-24.

[ 15 ] 毛志兵. 推进智慧工地建设 助力建筑业的持续健康发展[ J]. 工程管理学报, 2017, 31( 5 ) : 80-84.

MAO Z B. Promoting the construction of intelligent sites to advance sustainable and healthy development of construction industry [ J]. Journal of engineering management, 2017, 31( 5 ) : 80-84.

[ 16 ] 毛超, 彭窑胤. 智能建造的理论框架与核心逻辑构建[ J]. 工程管理学报, 2020, 34( 5 ) : 1-6.

MAO C, PENG Y Y. The theoretical framework and core logic of intelligent construction[ J]. Journal of engineering management, 2020, 34( 5 ) : 1-6.

[ 17 ] STEFANIC M, STANKOVSKI V. A review of technologies and applications for smart construction [ J]. Proceedings of the institution of civil engineers, 2019, 172( CE2 ) : 83-87.