

数字化驱动智能建造

清华大学土木工程系 张建平 林佳瑞

清华大学深圳国际研究生院 胡振中

清华控股有限公司 王珩玮

摘要：智能建造是面向工程产品全生命期，深度融合新一代信息技术的新型建造模式，旨在形成工程项目立项策划、规划设计、生产施工、产品交付、运维服务的一体化产业链和协同化运行体系，是推进建设行业转型升级的主导途径。本文针对智能建造需要突破的关键技术，提出在工程项目全过程数字化支撑下，面向智能建造的数字化思维、数字化路径以及数据驱动的智能 BIM 及全过程应用，为智能建造探索了可行的技术路径。

关键词：智能建造 数字化 智能 BIM 工程项目

1. 国家和行业数字化发展战略

当前，新一代信息技术快速发展，极大促进了各行业的数字化转型升级。其中，以 5G 通信、物联网、工业互联网等为代表的新一代通信与感知技术，使高效、高速获取大数据成为可能，为行业数字化提供了算据基础；以云计算、大数据、区块链等技术为核心的新一代数据计算技术，实现了超大规模分布式数据存储、处理与高效计算，结合 GPU、FPGA 等芯片技术，为行业数字化提供了算力环境；以数据挖掘、感知识别、深度学习为代表的新一代数据分析技术，推动了大数据驱动的新一代人工智能技术发展，为行业数字化提供了算法支撑。新一代信息技术极大地提升了数据获取、加工、处理和利用的能力，可实现数据增值成为“信息资产”，将推动各个行业的跨越式发展和变革。

在新理论新技术的驱动下，我国政府审时度势制定了推进互联网+、大数据、人工智能等一系列重大发展战略，其中包括国务院于 2015 年 7 月发布的《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》、2015 年 9 月发布的《促进大数据发展行动纲要》、2017 年 7 月《新一代人工智能发展规划》等。为贯彻国家发展战略，国家和建设行业相关部门也先后发布了一系列的相应政策。典型的政策包括：2020 年 3 月中央提出了国家“新基建”的重点发展方向，要加快 5G 网络、数据

中心等新型基础设施建设；对接“新基建”，住建部提出“新城建”发展战略，引领城市转型升级，推进城市现代化建设。2020 年 7 月，住建部联合 13 个部委发布了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》，制定了我国建筑产业的发展战略和产业体系，提出了 2035 年我国迈入智能建造强国行列的发展目标。

然而，我国建设行业的传统建造方式和管理体制相对落后，存在高消耗、高排放、低效能问题，而且数据基础设施薄弱，数字化水平低下。在国家数字化战略背景下，建设行业的数字化转型和智能化升级面临严峻挑战，使得数字化和智能化支撑的智能建造与建筑工业化发展受到了严重制约。

2. 数字化是智能建造的必经之路

2.1 智能建造及其关键技术

工程建造是建设工程项目包括立项策划、规划设计、生产施工、运维服务的建设全过程。

智能建造是面向工程产品全生命期，深度融合新一代信息技术的新型建造模式。旨在实现数字化驱动下工程项目立项策划、规划设计、生产施工、产品交付、运维服务等全生命期、全链条的一体化和协同化，促使建造过程实现设计数字化、建造工业化、管理现代化，是加快建设行业转型升级，实现生产方式根本变革的主导途径。

智能建造应用内容主要涵盖全过程数据智能感知、识别、采集，定位、跟踪、传输、监控和管理；数字化建模及数据管理平台；数字化协同设计；工厂化生产和自动化施工；数据驱动的决策管理。

智能建造是将建造技术与 BIM、云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术深度融合，具体包括以下关键技术：

- (1) 工程数字化建模与仿真技术：基于 BIM 定义工程产品，构建多维度数据关联关系，通过仿真其空间逻辑、物理逻辑和业务逻辑、真实动态映射建造全过程，实现工程产品及其建造过程的数字孪生；
- (2) 智能感知识别与控制技术：通过各种传感器实时感知建造过程和现场的状态信息，融合 BIM、物联网、移动互联网、云计算、智能识别、实时定位、数字监控等技术，实现项目建造全过程数据的智能感知、识别、采集，定

位、跟踪、传输、监控和管理，支持智慧工地和智能物流；

- (3) 工程大数据驱动的智能决策技术：建立基于大数据的知识模型和新型数据挖掘范式，通过数据挖掘、数据分析、数据洞察，实现工程建造的进度、成本、质量、安全等多个方面的超限趋势预警、偏差诱因提取、预测分析等，支持基于数据+算法的智能决策管理；
- (4) 自动化和智能化工程机械：在传统工程机械基础上，融合感知识别、定位导航、自动控制等技术，实现基于 BIM 和数据驱动的数字加工生产与机器人施工，替代人从事恶劣环境中的作业，提高工作效率，减少劳动力。

2.2 智能建造的数字化思维

综上所述，智能建造是以新一代信息技术为基础，以数字化、网络化和智能化为支撑，其中数字化又是实现智能建造的重中之重。

当前建设行业发展目标是推进行业和企业数字化转型升级，旨在利用数字化技术重塑企业和行业的组织关系，业务模式和生产方式，实现数据化管理。其总体策略是以工程项目全过程数字化为基础，以智能建造为切入点，通过 BIM 数字化建模及其全过程应用，实现算据、算力、算法三方面的整体提升，为行业和企业数字化转型升级提供数据基础和支撑。

数字化是将信息载体以数字编码的形式进行存储、传输、加工、处理和应用的技术途径，通过对物理对象/过程进行数字建模，形成计算机里的数字孪生。信息化则是在信息技术产业发展基础上，运用信息技术改造传统的经济、社会结构的过程。数字化强调信息应用的计算机化和自动化，将物理世界重构到数字化世界中；信息化则强调信息技术的应用，信息资源的共享，信息产业的发展，利用信息和信息技术改造物理世界，形成信息生产力。数字化是信息化的基础和方法，而信息化是数字化的价值所在，是数据在物理世界的应用。

从“十五”到如今的“十四五”，我国蓬勃开展的建设行业信息化，利用信息技术对建设企业和工程项目进行生产、经营、管理和决策，推动了行业信息化长足发展。但是由于数字化一直低位运行，数据处理技术相对落后，信息化实施步履维艰，收效并不理想。传统信息化过程是以企业或项目业务及其运行流程为主，体现的是业务驱动思维，仅利用信息手段提升或改造少量行为。在业务驱动 IT 的信息化模式下，是将业务过程数据录入系统中，形成的是业务运作的结果和历

史记录。数据作用也仅是后续的历史数据查询统计和分析。

数字化思维是要提高数字化运行水平，以数据驱动 IT，可产生新的业务形态或产品模式。这种数字孪生体既是对象的真实动态映射，还可通过构建多维度的数据关联关系，实现整体集成化计算，能反映现实、诊断和解决问题、预演未来。

2.3 智能建造的数字化路径

智能建造是以工程项目全过程数字化为基础支撑，实现建造全过程数据管理，其技术路径应该包括以下几方面。

(1) 数字化建模与仿真

建设领域数字建模是实现数据孪生的重要基础，也是工程大数据的主要来源。深度推进项目全过程数字化建模及其集成应用，实现工程建造全过程数据孪生，仿真其空间逻辑、物理逻辑和业务逻辑。融合物联网智能感知、动态在线数据，建立多维的数字触点，采取不同方式收集数据，保持“数据视图”在线，实现工程大数据多态化高增长，为行业大数据积累提供算据基础。

(2) 数字化管理平台

基于边缘计算分布式网络架构体系，构建自主可控的工程项目 BIM 云平台，乃至建立企业、行业大数据中心，提供 BIM 及工程大数据的分布式云存储、高效处理与计算，以及全息数字化模型创建、管理和应用机制和协同工作和业务逻辑控制机制，对工程建造全过程数据流、工作流进行管控，也为行业大数据管理、挖掘和分析提升算力支撑。

(3) 数字化产品服务

建立数字化设计、生产、运营的产品及服务综合体系，通过工程软件研发和产品化，形成以自主可控 BIM 软件为核心的全产业链软件生态，并与自主 CIM 平台生态贯通联动，支持数据驱动的工程项目立项策划、规划设计、生产施工和运维管理，形成一体化产业链，实现绿色可持续的工程产品交付与运维服务。

(4) 数据驱动业务运营与决策

基于 BIM 的数据孪生，可实现工程建造全过程动态映射，自动构建复杂的空间逻辑、物理逻辑和业务逻辑及其多维度的数据关联关系，可利用并发展更科学、更高效的算法和数据分析工具，提升数据不同纬度的拆分和分析，以数据分析驱动业务精细运营和管理。基于企业自身数据和行业大数据支持，形成立体、分层

的分析和趋势性判断，对产业、行业、产品及客户群体产生洞察与了解，以数据洞察驱动业务增长。从原有的流程及经验驱动决策，升级为以数据驱动决策。

(5) 人机融合的智能化工程装备

通过融合感知识别、定位导航、自动控制等技术，智能化工程装备具有自感知、自适应、自控制的特征。采用由人、机、环境相互作用的新型人机融合模式，形成机-机、人-机等多种协同范式，在运行过程中可以自主操控、智能监控和故障诊断。

3. 面向智能建造的 BIM 技术发展

面对国家和行业发展战略，如何进一步突破 BIM 技术、深化 BIM 应用，为行业数字化和智能建造提供数字基础与支撑，成为当前迫切需要解决的瓶颈问题。在 20 多年的系统性研究和实践基础上，清华大学 BIM 研究团队创新性提出以数据驱动的智能 BIM 及全过程应用，为工程项目全过程数字化和智能建造探索了可行的技术路径。

智能 BIM 具有 BIM 自主智能特性、大数据驱动、智能环境支撑等典型特征，其 BIM 自主智能特性的源于完整的 BIM 模型结构，应包括产品模型、过程模型和决策模型，并具备数据完备性、关联性及动态性特征，从而支持模型智能关联、自动演化、自主更新与数据驱动决策。

3.1 智能 BIM 环境支撑

随着新一代信息技术的快速发展，BIM 技术与物联网、人工智能、云计算、大数据等技术深度融合，逐步向智能 BIM 技术发展和演进。智能 BIM 首先需要硬件和软件环境支撑，智能硬件环境是以“新基建”中信息基础设施为基础，将各种智能化设备通过互联网连接起来，使各种设备能够自动交换信息、触发动作和实施控制，实现项目全生命期数据的智能感知、识别、采集，定位、跟踪、传输、监控和管理。

智能软件环境是基于“新基建”中融合基础设施，将 BIM 与云计算、大数据、物联网和人工智能相融合，实现项目全生命期的海量异构数据的融合、存储、挖掘和分析，从数据到信息、知识乃至智慧，支持智能建造和管理。

3.2 智能 BIM 应用支撑

工程项目全过程 BIM 建模与集成应用是智能 BIM 的应用支撑，也是行业数字化建模和大数据积累的唯一途径。面向工程全过程 BIM 集成应用包括三个层面：土建、机电、幕墙等多专业的集成应用；建设方、设计方、施工方和运维方等多参与方协同应用；规划、设计、施工和运维等跨阶段应用。

要实现这三方面的集成应用，必需全生命期 BIM 创建技术支撑，包括全生命期 BIM 体系架构和信息共享环境、全生命期 BIM 建模技术、全生命期 BIM 数据存储与管理技术、BIM 子模型提取与集成技术等等。也离不开一系列 BIM 集成应用管理支撑，包括 BIM 应用标准导则、基于 BIM 的管理模式与方法、基于 BIM 的业务流程组织与控制等。这些技术与管理支撑都通过统一的 BIM 平台融为一体，支持项目全过程三个层面的 BIM 集成应用，形成完整 BIM 数字建模，为项目全过程数字化和工程大数据积累提供数据基础。

3.3 智能 BIM 管理支撑

BIM 平台与数据中心是智能 BIM 的管理支撑，也是工程大数据管理和挖掘的重要基础。

(1) BIM 平台的基本功能与技术特征

BIM 平台作为面向用户的应用平台，具有三大基本功能：

- 1) 提供工程项目全生命期 BIM 创建、管理和应用机制，实现项目全生命期各阶段、多参与方和各专业信息共享和无损传递。
- 2) 提供协同工作和业务逻辑控制机制，实现多参与方协同工作及其业务流程组织与调度。
- 3) 提供 BIM 应用软件和相关业务软件运行环境以及通用的基本业务功能，实现基于 BIM 的各项业务功能。

通常情况下，典型的 BIM 平台具有四个重要技术特征：

- 1) 基于开放标准的 BIM 结构体系，能够对项目设施实体及其空间逻辑、物理逻辑、工程逻辑以及相关特性进行完整的数字化表达。
- 2) BIM 建模技术能够构建模型的空间拓扑关系、物理及工程逻辑关系，支持模型智能关联、自动演化、自主更新与数据驱动。
- 3) BIM 存储技术能够支持对象级数据的分布式云存储，具备结构化数据、非结构化数据以及流式数据的存储和管理能力。

4) BIM 集成技术能够支持 BIM 数据的提取、集成以及与物联网、GIS、外部系统等异构数据融合。

(2) 面向智能 BIM 的 4D-BIM 云平台

BIM 平台作为 BIM 技术及其应用的核心支撑，支持项目的全过程应用，承载项目的全息数据，平台应用密切关系到数据安全保障、数据资产流失等重大问题。然而，目前我国相当一部分建设项目仍在使用国外的平台及软件，存在极大隐患。随着 BIM 应用的普及推广，研发我国自主可控 BIM 平台及应用软件得到国家及行业的高度重视，被列入急需突破的“卡脖子”技术及产品。清华大学 BIM 研究团队长期致力于 BIM 理论、方法、技术及其应用的系统性研究，研发了具有完全自主知识产权的 4D-BIM 平台及一系列应用软件，并获得科技成果转化，已成功应用于数百个工程项目，处于国内外领先地位。

基于智能 BIM 理念和技术研发的 4D-BIM 云平台架构如图 1 所示。4D-BIM 云平台以底层大数据、云计算系列支撑技术为基础，包括可扩展服务器、云数据库、大数据和分布式存储等，可提供安全、高弹性和低成本的云服务，实现基于云架构的分布式 BIM 数据存储。在此基础上，研发形成了数据引擎、图形引擎、物联网集成引擎等数据中台，并且以数据服务、图形服务、界面服务和配置服务的形式，形成了面向设计、施工及运维应用的模块化服务体系。平台面向大规模数据的处理提供了复杂网格切分、重复网格归并、网格简化、LOD 计算、几何压缩、瓦片加载等 BIM 模型轻量化和高效处理的算法，支持大规模模型数据高效、低耗、流畅加载；同时，平台应用了高速缓存、cdn 加速、异步数据加载、大数据分析以及智能搜索引擎等技术，具备快速响应、便捷操作和智能化能力。

4D-BIM 云平台具备灵活的系统集成与设备接入能力，形成智能环境支撑，其中包括各种数据采集设备、智能感知设备、多端操作终端、外部系统及其监控设备以及可视化展示终端等。

作为国内领先的全生命期 BIM 平台，4D-BIM 云平台凸显了超前的技术优势。4D-BIM 云平台及所支持的集成施工、智慧运维、智慧梁场、公路动态量价等应用系统已成功应用于建筑、桥梁、公路、地铁和市政等多个工程领域的数百个工程项目，体现了明显的应用优势。

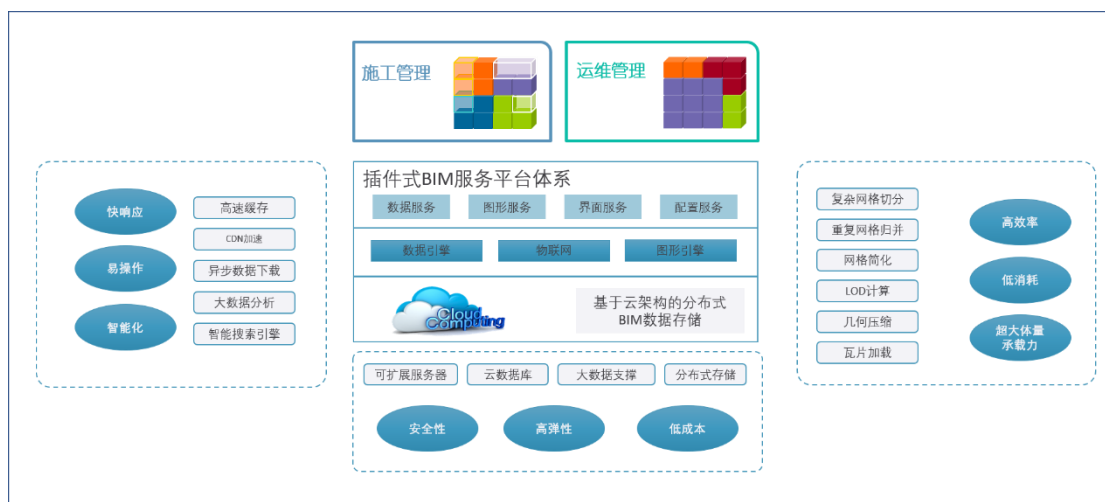


图 1 4D-BIM 云平台架构图

3.4 智能 BIM 技术支撑

BIM 平台及数据中心的形成与应用，为进一步融合智能技术，利用大数据驱动智能管理和决策提供了技术支撑。BIM 与智能技术融合应用包括数据驱动管理、动态数字监控、智能感知定位、“数据+算法”的智能决策等。

(1) 数据驱动管理

4D-BIM 云平台可为用户提供时空数据搜索引擎与聚合分析、模型自动定位与业务数据智能关联、业务联动和关联分析以及多级模型提取等数据驱动管理功能。

1) 基于时空特征的信息搜索和聚合分析：针对任何模型对象或构件的空间特征，实现任意特定时间的工程业务数据和人材机资源数据的搜索和聚合分析，提供专业职能管理和决策分析。如计算任意部位在任意时间段的工程量完成情况、成本或人材机投入情况等。

2) 模型自动定位与业务数据智能关联：通过建立模型构件与业务数据之间的映射规则，实现模型与业务的智能动态关联，当模型变更或业务数据变化时，关联将自动调整。

3) 业务联动和关联分析：实现相关业务系统的智能联动和关联分析。如将动态算量系统与人材机管理系统相联动，可将算量系统计算的指定部位在指定时间段的工程量及人材机需求量，自动关联到人材机管理系统，判断派工前置人材机资源配置是否满足需求，并进行相应的资源调配和处理。

4) 多级模型提取：根据应用需求，提取不同细度模型，可支持从宏观到精细的多层级管理，有效应对大规模、区域性和长线工程 BIM 管理和展示。

(2) 动态数字监控

BIM 融合数字监控实现数据多态增长，将 BIM 与数字监控，现代测量，三维激光扫描等技术融合，有效解决施工现场的质量安全的动态监测与分析，以及复杂结构施工的自动定位和精度分析问题。同时，围绕施工现场，实现现场实时环境监测和管理，包括扬尘浓度、颗粒物浓度、噪音指数以及视频监控等。

(3) 智能感知定位

通过 BIM 与物联网技术融合，实现二维码、RFID、红外感应、激光扫描等传感信息与 BIM 关联，解决 BIM 应用中的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。可将 IOT 设备定位在模型中，动态标识其运行状态，实现 IOT 设备状态实时监控，追踪实时数据并提供报警服务。智能感知定位技术已成功应用于施工过程及现场的安全与环境监控，施工物料配置与物流追踪，以及项目智能运维中的设施设备运行监控、故障感知识别、能耗和碳排放监测等。

(4) “数据+算法”的智能决策

基于云架构的项目全过程数据存储、大数据搜索引擎以及数据融合、挖掘机制，可支持深度学习、自然语言处理、感知识别等分析算法，建立了“数据+算法”的智能决策体系，通过时空搜索聚合分析、趋势预测分析、频繁模式挖掘、异常监测、自动分类聚类等一系列分析工具，可针对项目设计、施工、运维阶段的实际需求提供分析和决策，也可为企业层的领导决策和各项业务管理提供基于数据深度分析的支持。

4. 问题与应对

按照国家数字化发展战略以及建设行业的政策导向，以智能建造作为切入点，推进建设行业转型升级已是大势所趋。然而建设行业仍然面临数据基础设施薄弱、大数据积累欠缺等问题，导致数字化水平并无明显提升；新一代人工智能技术应用仍处于初级阶段，缺乏系统化的解决方案；作为数字化基石的 BIM 技术的普及应用仍面临着标准体系不完善、政策法规不健全、关键技术待突破、应用软件不配套等诸多问题，尤其是数字孪生模型引擎、核心建模软件等瓶颈技术缺乏，致使 BIM 设计应用受阻，BIM 集成应用困难，难以实现完整 BIM 数字建模，不

足以支撑项目全过程数字化和智能建造。

行业数字化转型和智能建造涉及多个建设主体，深受政策导向、市场环境、研发部署、推广机制等，其发展任重道远。本文研究通过工程项目全过程数字化，对贯通工程建造数据链和业务链探索了技术路径，然而贯通工程产业链和供应链不仅需要技术支撑，还必须对不同环节、生产体系、组织方式、经营模式、企业合作等进行全方位变革和数字化赋能。目前当务之急是建立推进智能建造的组织体制和协同运作机制，完善数据基础设施；加大科技攻关和平台软件的研发投入，突破“卡脖子”关键技术，形成自主可控的以 BIM 软件为核心的全产业链软件生态；通过完整的顶层设计，规划 BIM 应用、数字化发展和智能建造实施的路线图，分阶段、分步骤循序推进 BIM 深度应用和工程项目全过程数字化，以数字化驱动智能建造快速发展。

参考文献

- [1] SACKS R, EASTMAN C, LEE G, 等. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers[M]. John Wiley & Sons, 2018.
- [2] 林佳瑞. 面向产业化的绿色住宅全生命期管理技术与平台[D].清华大学,2016.
- [3] 林佳瑞,张建平.我国 BIM 政策发展现状综述及其文本分析[J].施工技术,2018,47(06):73-78.
- [4] 张建平,李丁,林佳瑞,颜钢文.BIM 在工程施工中的应用[J].施工技术,2012,41(16):10-17.
- [5] 林佳瑞,张建平.基于 BIM 的施工资源配置仿真模型自动生成及应用[J].施工技术,2016,45(18):1-6.
- [6] 胡振中,彭阳,田佩龙.基于 BIM 的运维管理研究与应用综述[J].图学学报,2015,36(05):802-810.
- [7] ZHANG J, LIU Q, HU Z. A Multi-Server Information-Sharing Environment for Cross-Party Collaboration on a Private Cloud[J]. Automation in Construction, 2017, 81: 180–195. DOI:10.1016/j.autcon.2017.06.021.
- [8] ZHANG J, HU Z. BIM-and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Principles and methodologies[J]. Automation in construction, 2011, 20(2): 155–166.
- [9] LIN J-R, ZHANG J-P, ZHANG X-Y. Automating Closed-Loop Structural Safety Management for Bridge Construction through Multisource Data Integration[J]. Advances in Engineering Software, 2019, 128: 152–168. DOI:10.1016/j.advengsoft.2018.11.013.
- [10] ZHANG Y-Y, KANG K, LIN J-R. Building Information Modeling–Based Cyber-Physical Platform for Building Performance Monitoring:[J/OL]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2020[2020–05–18]. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1550147720908170>. DOI:10.1177/1550147720908170.
- [11] ZHOU Y-W, HU Z-Z, LIN J-R. A review on 3D spatial data analytics for building information models[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(5): 1449–

1463.

[12] WEN Q, ZHANG J-P, HU Z-Z. A data-driven approach to improve the operation and maintenance management of large public buildings[J]. IEEE Access, 2019, 7: 176127–176140.