



住房和城乡建设部“十四五”规划教材  
中国建筑学会计算性设计专业委员会推荐教材  
高等学校智慧建筑与建造专业系列教材

# 智慧建筑与 建造导论

Introduction to  
Smart Building  
and Construction

孙澄 编著

中国建筑工业出版社

2.3.1	环境信息集成建模 .....	070
2.3.2	设计方案智慧生成 .....	074
2.3.3	建筑性能映射建构 .....	079
2.3.4	建筑方案智能决策 .....	083
2.4	建筑智慧设计工具 .....	086
2.4.1	环境信息集成工具 .....	086
2.4.2	方案智慧生成工具 .....	090
2.4.3	建筑性能预测工具 .....	093
2.4.4	方案智能决策工具 .....	095
2.5	本章小结 .....	097

### 第3章 建筑智慧建造 ..... 098

3.1	建筑智慧建造的相关理论 .....	098
3.1.1	基本概念 .....	098
3.1.2	建筑智慧建造发展历程 .....	100
3.1.3	建筑智慧建造的内涵 .....	105
3.1.4	精益建造理论 .....	106
3.1.5	批量定制理论 .....	108
3.1.6	数字建构理论 .....	109
3.2	建筑智慧建造方法 .....	111
3.2.1	准备阶段：设计建造一体化 .....	111
3.2.2	执行阶段：建筑数字建造 .....	113
3.2.3	交付阶段：竣工模型的一体化管理 .....	116
3.3	建筑智慧建造技术 .....	118
3.3.1	BIM 技术在智慧建造中的应用 .....	119
3.3.2	GIS 技术在智慧建造中的应用 .....	122
3.3.3	物联网 + 大数据技术在智慧建造中的应用 .....	124
3.3.4	建筑机器人在智慧建造中的应用 .....	126
3.3.5	VR/AR 技术在智慧建造中的应用 .....	130
3.3.6	人工智能技术在智慧建造中的应用 .....	132
3.4	建筑智慧建造工具 .....	136
3.4.1	智慧工地管理工具 .....	137
3.4.2	数字建造软件 .....	139
3.4.3	数字建造设备 .....	144

## 3.2 建筑智慧建造方法

伴随着数字化加工技术在汽车、航空航天等加工领域的应用逐渐成熟,建筑工程领域的从业人员也在探索建筑智慧建造理论及相应的智慧建造方法体系。本节从智慧建造过程的角度,通过准备阶段、执行阶段和交付阶段等三个建造阶段阐述智慧施工(可视化施工模拟、可视化施工管理等)和智慧制造(制造资源管理、计划管理、制造过程管理、质量管理等)过程的实现方式;从建造方法的角度,对智慧建造体系进行剖析,论述平台层、感应层、外联层和基础设施层等功能层的系统设计,以及这些功能层在具体建造环节中开展应用的方法说明,体现工厂化加工、精密测控、自动化安装、动态监测、信息化管理的整体逻辑。

### 3.2.1 准备阶段:设计建造一体化

“设计建造一体化”是指在建筑工程项目中将设计阶段和施工阶段集成到一个单一的过程中的方法。传统的项目管理方法通常涉及将设计和施工分为两个独立的阶段,分别由不同的实体(设计单位和承包商)负责。设计建造一体化的方法将这两个阶段合并为一个协作的过程,通过一套统一的工作流程实现从设计到建造的一体化。

建筑设计与建造全流程的一体化是当下建筑信息模型和建筑工业化的一个显著趋势,而相应数控设备发展和应用则是实现这个趋势的关键。这种一体化包括两个方面:建筑全流程的一体化与建筑设计师职能的高度集成化。

建筑数字技术的发展极大地推动了数字生成方法的拓展与数字建造技术的深入,让建筑在设计建造之间形成一条由信息承载的连续数字链条,让它们所组成的数字建构理论建立成为可能。在数字建构理论不断深入发展的背景下,经典的传统建筑追求——维特鲁威提出的建筑三原则:实用、坚固、美观有了新的现代意义延伸。

在近十年数字建构思想积极发展的背景下,数字建造技术的飞跃逐渐能够弥补设计和建造之间的裂缝,也有越来越多的建筑师与研究学者试图将形式、性能与建造运用数字化的对接方法进行整合,形成了“形式追随性能”的一体化建构思想。

从传统模式的建构流程,是一个从建筑师“设计意图”到“建筑制图”再到“建筑模型再现”最后到由施工方负责“建造”的过程。在此过程中,建筑师的能力成为制约建筑表现的核心。建筑制图也成了设计意图到建造之间最核心的步骤——想要实现出来,必须先要画出来。因此,传统的设计建造流程趋向线性且分离,这种信息单

向叠加的模式对设计意图的传达和设计方式造成了局限。

计算性设计驱动下的设计建造流程,不同于传统模式,借助数字化设计方法达成的人机协作,重新建立起从“设计意图”到“建造”之间的全新连接,形成了由设计者可以在设计到施工过程的任何阶段进行二次构思和优化,形成从生形(Formation)、迭代(Iteration)、模拟(Simulation)、优化(Optimization)到加工与建造(Fabrication and Construction)的动态一体化建构流程。最终得到的成果并不是预先给定的,而是从设计目标出发,依照逻辑逐步推演而来,如图3-8所示。

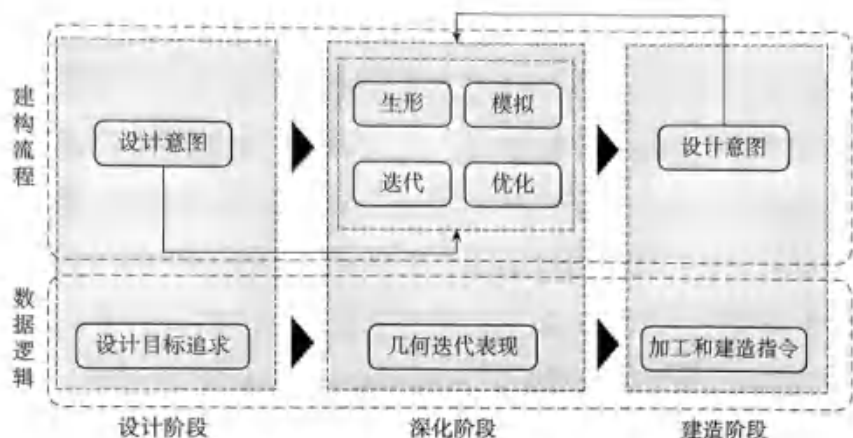


图3-8 设计建造一体化流程框架<sup>[81]</sup>

从数据逻辑建立来说,性能驱动下的建构进行着从“设计目标追求”到“几何迭代表现”再到“加工建造指令”的数据传递,以具有设计目标性的“设计意图”自上而下为指导和具有加工限制性的“建造”自下而上为依据,进行整个建构流程的迭代优化,直到形成满足高效性能要求的建构选择。对应建筑复杂形态的项目建构阶段,分别是初步设计阶段、模型深化阶段与加工建造阶段,如图3-9所示。

进行设计工作时,算法和程序的运用将数字化设计工具贯穿于设计与建造之间,设计通过材料和空间实现,而不是仅仅停留在形式的层面。而结构的选型会对建筑外观、构件的形式、材料的选择、建造方式、结构性能以及整体的经济性和合理性产生诸多方面的影响。不同的结构会对建造方式产生很大程度的影响,如受压拱结构可以采用下支模板的方式进行建造,也可采用设备吊装与人工协同的方式进行建造。同一种结构形式可以采用不同的方式进行建造,但更多的是不同的结构形式对应着不同的建造工艺与方法。



图 3-9 设计建造一体化的数据逻辑<sup>[82]</sup>

相较于以往先设计方案再规划建造方案的单向流程，建筑设计建造一体化的具体表现是：在同一平台下进行设计的同时展开建造方案设计，通过模拟仿真进行实时反馈，以达到设计与建造的平衡，即通过数字化设计平台将建造、结构生型以及模型优化进行整合，三者相辅相成，共同促进了一体化设计的发展。建筑师在同一平台下以结构性能串联设计流程与建造流程并优化相关的设计方案与建造方案，实现从设计到建造的全流程把控。

### 3.2.2 执行阶段：建筑数字建造

数字建造工艺的发展对智慧建造流程的探索起到了积极的作用，形成了集参数设计、性能优化、几何转译和机器人施工于一体的智能化设计建造流程，精准指导了包括砖、石、木、塑料、金属及复合材料的数字化建构实践。

对材料、结构的性能植入是建筑数字建造前期进行参数化找形的必要环节，也是相较于传统设计方式的优点之一。通过在前期曲面找形阶段引入各类形态计算或结构计算的非标准形态优化插件或算法，使最终呈现的形态可以充分利用结构特点并发挥材料性能。

性能化设计依托可计算的数据流，实现设计的精准表达，也为建造阶段的精准控制提供了依据。得益于设计建造一体化方法，数据流可以从设计阶段平顺过渡至建造阶段，并在各个建造设备之间互相传递，借助可视化设备，人与建造设备之间形成的网格化反馈关系，也形成了人机协作的工作状态。

建筑数字建造方法不仅局限于对建筑的数字化设计，同时也包括建造设备设计、建造行为控制和算法开发的一整套流程。对于不同建筑类型和建筑材料，可形成以下两种特定路线的建造方法。

### 1) 砖结构数字建造案例

在前期曲面找形阶段引入使用 C 语言编写的曲率优化插件,使最终像素化的砖块能够符合砌筑需要的极限曲率要求;另外,在结构模拟中,对曲面墙体所需的配筋进行结构优化,并对钢筋在最终完成面中的位置进行检查;对建造的曲面进行施工预分块、现场定位与建造顺序标定,最终指导与保障现场数字施工的可实施性。数据通过参数的形式在设计与建造间传递,基于材料与结构性能的优化过程,可以不再区分形式生成与实体建造的过程。

基于性能化设计与机器人现场砖构的智能化设计建造方法,将设计的概念从传统图纸的二维化表达以及建筑模型的三维化建模,扩展到建造过程的时间性模拟,并实现了精准控制。如图 3-10 展示了基于砖结构的数字化建造实践。对于情况多变的现场建造的复杂问题,通过构建多智能体系统的方式,通过“自下而上”的“自组织”方式,呈现不断趋于优化的结果。找形与优化被扩展至施工阶段,设计和施工相互交织,机器学习与算法思维贯穿了整个建筑的设计建造过程。通过在三维建筑几何模型的数据框架上引入时间维度,建筑师不但可以模拟施工现场材料建构的过程,还可以直观分析机器人在未知区域运动可能发生的问题,并及时进行矫正<sup>[105]</sup>。



图 3-10 基于砖结构的数字化建造实践<sup>[85]</sup>

### 2) 钢结构数字建造案例

钢结构形式作为刚性结构的典型代表,其形态会因为结构内部产生的扭矩和形变,从而影响结构稳定性。基于最大机械效率和最少材料使用的设计原则,得出的结构形式具有最小的弯矩、应变能量和形变,使得结构表面的能量最小化。基于进化

和自组织原则的数字算法通过拓扑的交互式分析来评估形式，迭代计算应力和形变对形式的影响，生成符合拓扑关系的最佳结构形式。

在“钢铁之心”的力学找形过程中，设计者选择形式语法生成的最佳空间路径作为设计原型，由钢板组成基础几何形态作为找形的支点，初步建立应力、扭矩、形变、材料之间的关联并开始力学找形。给定基本体量后，在 Millipede 中模拟极限应力条件，基于推算的力流分布生成空间连续应力线，将其抽象为结构加强线条再轧制为钢板面的图案形态，强化结构稳定性，并借助应力线生成的钢板形式呈现出自组织特征，在完善刚性结构力学性能的过程中实现形式优化。

在项目建造过程中，首先基于遗传算法所提供的搜索技术，选择使用最少材料的曲面分区方式，将所有曲面划分为若干面板组件，得到满足材料强度、挠度和经济用钢量的分区方案，如图 3-11 所示；其次通过面板分析对比 57 块面板与标准钢板的面积，确保数字机器人能够冷轧并切割出小于标准钢板的组件；最后按照软件模拟的建造步骤用螺栓将钢板连接组成最终形态，即完成钢结构装置的搭建，最终搭建效果如图 3-12 所示。

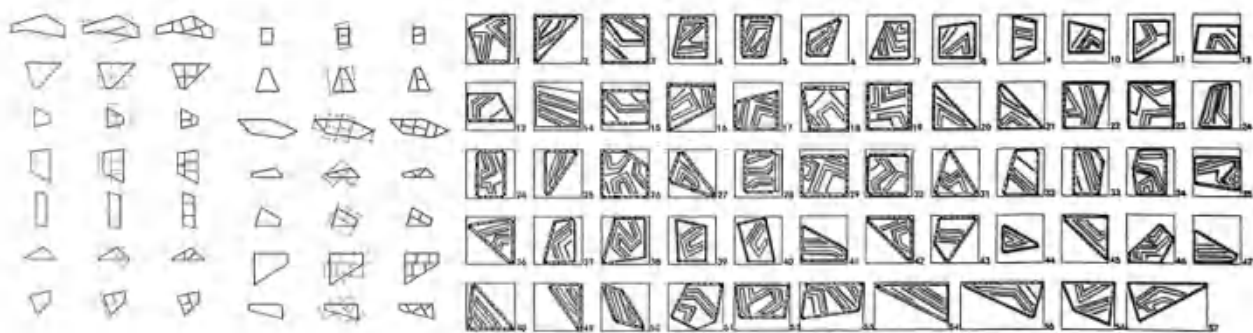


图 3-11 “钢铁之心”曲面划分方案<sup>[86]</sup>

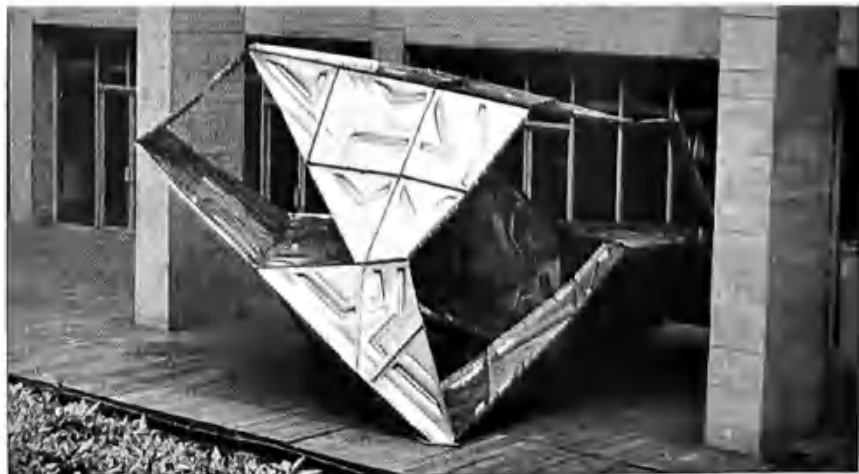


图 3-12 “钢铁之心”实景<sup>[86]</sup>

### 3.2.3 交付阶段：竣工模型的一体化管理

竣工交付阶段主要工作量由项目经理向总监理工程师提交竣工验收报告，并由建设单位组织施工单位、监理单位和设计单位等进行竣工验收。在传统的竣工交付阶段，施工单位的主要工作包括施工文件档案管理、竣工决算管理和工程项目试运行管理。基于 BIM 技术的智慧建造过程，从设计阶段或施工准备阶段引入 BIM 模型，实现全过程信息传递与交互，BIM 模型包含的数据库也在不断完善过程中提升效率。以装配式建筑的建造过程为例，引入 BIM 模型可对建造全流程进行有效管理，对于施工过程进行有效调控，在对接前期的设计阶段和后期的运维阶段，能够实现数据全流程贯通，如图 3-13 所示。

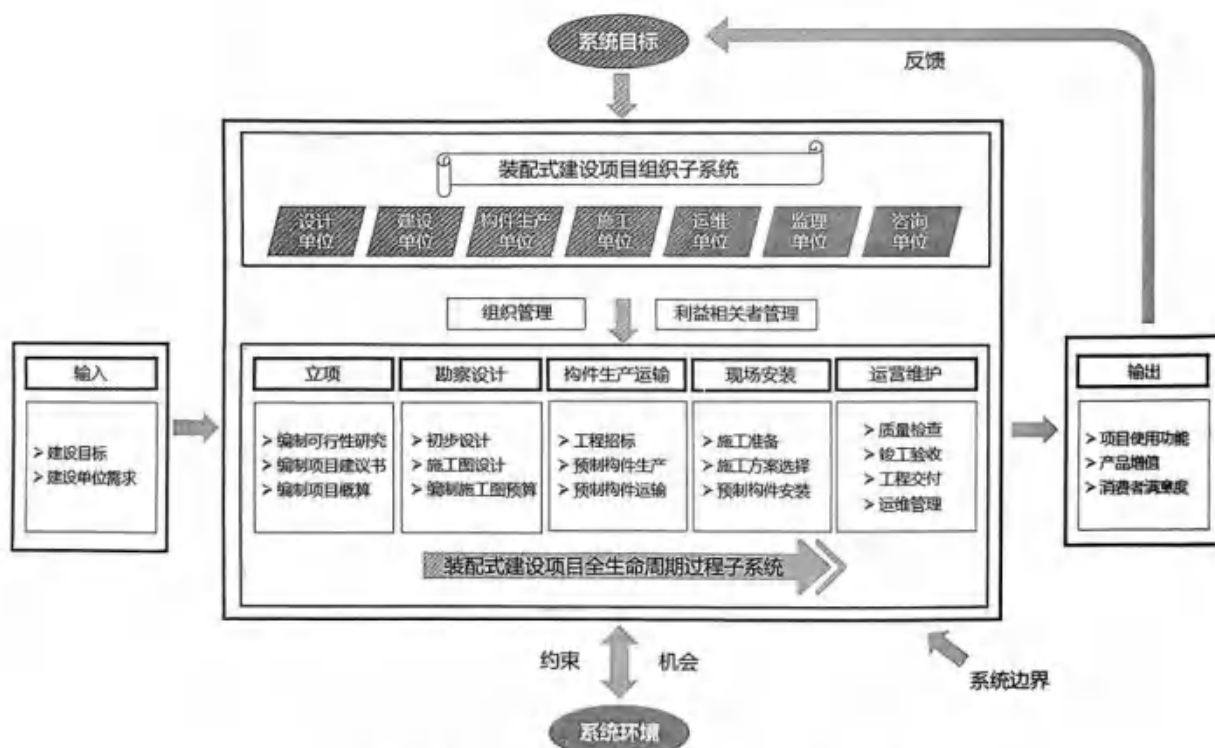


图 3-13 装配式建筑的 BIM 竣工模型一体化管理<sup>[69]</sup>

将已提取的装配式建设项目系统要素，作为基于 BIM 的装配式建筑智慧建造管理体系的构建依据，融合了智慧建造的思想，以智慧化为原则，进行基于 BIM 的装配式建筑智慧建造管理模式构建。把装配式建筑智慧建造过程分为组织、设计、生产、运输安装和运营维护五个阶段，结合装配式建设项目一级系统要素研究，最终确定基于



BIM 的装配式建筑智慧建造管理体系的一级指标为：智慧组织管理、智慧设计管理、智慧生产管理、智慧运输及安装管理、智慧运维管理、智慧建造平台管理。根据确定的一级指标，将装配式建设项目二级系统要素进行合理筛选、归并和智慧化，最终完成完整的基于 BIM 的装配式建筑智慧建造管理体系的构建和详细解释。

竣工模型交付过程中，具体实施要点主要包含以下三个方面。

#### 1) 图纸与模型一致性核查

受工程工期或其他因素影响，图纸版本及设计变更较多，容易出现模型更新速度滞后的情况，导致最终模型与竣工图纸不符。因此在竣工交付时进行图、模一致性核查的工作十分重要，通过核查可极大程度上避免模型错误与遗漏，使其完整反映图纸设计内容。此项工作难点在于需将全部图纸与模型进行同步比对核查，传统核查方式耗费时间较多，人力投入较大。

核查过程中要使用相关软件，将三维 BIM 模型与二维设计图纸同步进行浏览查阅，可大幅提升审查工作效率及质量，确保交付给建设单位的竣工模型能包含项目全部设计变更内容，满足后期运维阶段对图纸与模型一致性的需求。

#### 2) 模型与实物一致性核查

施工过程中因人为等因素，经常会导致现场实际施工情况与设计图纸存在偏差，致使 BIM 模型与实物存在不符情况问，这便需要通过模型与实物一致性核查工作来解决。模型与实物一致性核查工作随着智能设备的不断普及，通过三维激光扫描、全景影像采集、影像资料与图纸关联等方式可有效辅助核查工作提质增效，如图 3-14 所示。

例如，在机电安装及装饰装修施工阶段，BIM 模型与现场实物一致性核查的重点主要为各专业设备、末端点位的数量及位置核查。为提升现场信息采集效率，减少了



图 3-14 智能化的模型实物一致性核查<sup>[89]</sup>

人力成本投入，项目采用智能全景相机设备，分阶段对现场实景进行采集。之后通过将各个采集点位的影像数据与二维图纸进行关联。在进行模型与实物一致性核查时，可直接通过调取各个点位全景影像数据来获取现场实际情况，进而对竣工模型做出调整，极大程度上提升了核查效率。经整理后的全景影像资料同时也可作为竣工交付成果移交建设单位及运维单位使用，有效提升项目竣工交付效率。

### 3) 运维资产信息盘点与数据关联

模型竣工交付除应做好图、模、实一致性核查之外，运维资产信息盘点及模型与信息关联工作也十分重要。施工单位应提前与建设单位、运维单位、楼宇智能单位等进行沟通，确定运维阶段所需资产信息清单项以及构件编码规则、之后将所需信息与模型构件进行关联。资产信息与模型构件关联通常采取以下两种方式：①直接将信息录入至模型构件；②通过模型构件编码，将信息与构件进行关联，信息可统一存放在独立数据库中，即采用“数模分离”的方式。前者需投入大量人力进行信息录入工作，后者则需要企业单位具备较强的 IT 技术能力进行数据库搭建与维护，便于项目在运维阶段对建筑信息实行有效的数据对接与管控。

### 习题：

1. 性能驱动下的建构进行着从（ ）到（ ）再到（ ）的数据传递，对应建筑复杂曲面的项目建构阶段，分别是（ ）阶段、（ ）阶段与（ ）阶段。
2. 数字建造工艺的发展对智慧建造流程的探索起到了积极的作用，形成了集（ ）（ ）（ ）（ ）于一体的智能化设计建造流程。
3. 简述设计建造一体化的优势与特点。

### 思考题：

现有的智慧建造方法应如何破局以推广与应用？

## 3.3 建筑智慧建造技术