

建筑工业化视角下的高层住宅立面自动生成*

Automatic Generation of High-rise Residential Facades from the Perspective of Building Industrialisation

吴佳倩¹, 李飏², 莫怡晨³

WU Jiaqian, LI Biao, MO Yichen



开放科学 (资源服务)

标识码 (OSID)

[本文引用格式]

吴佳倩, 李飏, 莫怡晨. 建筑工业化角下的高层住宅立面自动生成 [J]. 南方建筑, 2022 (4) : 25-31.

WU Jia-qian, LI Biao, MO Yi-chen. Automatic Generation of High-rise Residential Facades from the Perspective of Building Industrialisation[J]. South Architecture, 2022(4):25-31.

摘要 揭示系统化集成设计在新型建筑工业化背景下的重要作用, 以高层住宅这一类型为例探索立面生成技术路径。从信息整合、生成方法、工具实现三个方面展开研究, 提出层级式描述方法梳理数据信息, 研究立面构成类型, 基于内部功能建立平、立面之间的映射关系并编码转化。基于 Java 和 Revit 平台, 通过主从式架构开发面向建筑师的生成设计工具, 可实现依据输入平面生成不同风格的立面模型, 并集成相关指标及下游生产建造数据。系统化集成设计方法整合各环节信息, 构建与建筑物质化实现过程对应的数字链, 有利于推动设计 - 建造一体化。

关键词 建筑工业化; 系统化集成设计; 高层住宅; 立面; 生成设计; Revit 二次开发

*** 基金项目** 国家自然科学基金面上项目 (51978139) : 以特征向量矩阵运算为导向的建筑空间组合与生成系统研究; 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX20_0024) : 高层住宅立面生成研究与 Revit 平台生成工具开发; 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (3201002110D) : 高层住宅立面生成研究与 Revit 平台生成工具开发。

中图分类号 TU972

文献标志码 A

DOI 10.3969/j.issn.1000-0232.2022.04.004

文章编号 1000-0232 (2022) 04-0025-07

作者简介 ¹ 硕士研究生; ² 教授, 通信作者, 电子邮箱: jz_studio@126.com; ³ 博士研究生; ^{1&2&3} 东南大学建筑学院建筑运算与应用研究所

ABSTRACT With the development of information technology, the focus of the industry is gradually shifting to new building industrialization, with new requirements for the integration and sharing of building information. This study intends to reveal the important role of systematic integrated design in this context, taking the high-rise residential building type as an example and using digital methods to establish a highly integrated information management system at the design stage. There is also a discussion of the technological path of facade generation and strategies of tool implementation.

The research was carried out in three stages - information integration, generative method and tool implementation. Aiming for high-level semantic information in architectural problems,

a hierarchical description method was introduced and the data coded top-down in four levels - volume, standard layer, bay and component, including 3D geometric primitives, component attributes and topological relations. Type research was conducted on facade composition, taking three typical organization modes as examples to extract geometric features and combination rules. A mapping relationship between plans and facades was established based on internal functions and converted into a series of predefined rule sets to explore a rule-based facade generative method and output relevant indicator data in real time. An architect-oriented tool architecture was proposed with the Revit secondary development add-in as the front end and Java as the back-end server. This meant the generative tool could be embedded into the architect's workflow smoothly to optimize building information management and promote data integration and the application of systematic integrated design.

Developing the generative design tool through C/S architecture allowed connection and information exchange with the upstream and downstream data forms. The Revit add-in processes plan information, collects user input parameters and sends a request to the server; the server responds and returns the result after the operation is completed; the client parses the data stream and downloads corresponding Revit Family files from the component library and finally completes the modelling in the local document and the calculations of related indicator data. The tool can generate different styles of Revit facade models according to the input plans and the generated results are editable with structured data and integrate model information (e.g., length, area, etc.), performance indicators (e.g., body shape coefficient, window-wall ratio, etc.) and some downstream data on production and construction (e.g., specifications and quantities of components, etc.) that can assist architects in overall designing.

Relying on digital technology, the systematic integrated design method integrates the information on all aspects of building production and extracts rules from design paradigms by encoding architectural semantic information. It transforms design intuition and experience into standardized processes and standardized

construction and production systems into sharing digital assets. It can also build a digital chain corresponding to the building materialization, which is conducive to promoting a system of standardized design, automatic production and assembly construction, making production and construction controllable. At present, the degree of informatization in the construction industry is still low. The implementation of industrialization-oriented generative tools requires the cooperation and communication of upstream and

downstream stages to realize the information sharing and data continuity of projects. Under the guidance of industrialized thinking, architects can strengthen the control of the production and construction stages through systematic integrated design in the early stage and provide a good data foundation for the downstream industrial chain.

KEY WORDS building industrialisation; systematic integrated design; high-rise residence; façade; generative design; Revit secondary development

引言

第四次工业革命的背景下,信息技术驱动着社会生产方式的数字化转型,建筑业也面临着行业整合与产业升级的重大变革。尤其是进入 21 世纪后,建筑师所面对的信息数量翻倍,所要处理的问题复杂程度激增^[1]。2020 年 9 月,住房和城乡建设部等九部门联合印发的《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》指出,行业应重点推进系统化集成设计与精益化生产施工,实现建筑工业化^[2]。下游生产建造环节的转型升级,要求建筑设计阶段进一步优化数据集成模式,更好地实现信息整合与共享,形成从智能设计到先进建造完整“数字链”系统^[3]。当前,设计方面仍以单项技术推广为主,缺乏有效整合^[4]。而生成设计方法具备数字化、信息化、智能化的特征,这种依托于结构化数据的设计模式有利于提高设计与生产及建造环节的对接效率,从而推动建筑全产业链的工业化进程。

在建造层面,以装配式住宅为代表的精益化施工则是促进工业化的关键路径。近年来,我国开展了一系列住宅产业化试点工作,市场上涌现了一批装配化建造住宅项目。其中,高层住宅具有市场需求大、实践项目多、标准化程度高的特征,因此,高层装配式混凝土建筑发展较快。这一建造方式需要对建筑进行系统性拆分,涉及建筑材料、部品部件等方面的海量数据。目前,装配式住宅的建设过程仍存在设计、生产、建造相分离的情况。改变这一现状有赖于从设计端建立高度集成的一体化信息管理体系。

立面造型作为高层住宅建设的一个子问题,信息整合可为其提供更高效的系统化解决方案,综合提升设计深度与建造完成度。建筑生成设计方法通过剖析住宅立面构成要素,提取组合逻辑并转化为编码信息,应用于基于规则的过程建模方法^[5]生成具备可信细节的立面模型,

由此产生一系列的语义化、结构化数据。相关程序工具实时反馈当前方案的量化指标及建造数据,为系统化集成设计提供数据支撑和理性参考。这一信息组织模式一方面可以辅助建筑师进行方案的评估和调整;另一方面,有利于数据的统一管理及后续对接精益化生产施工。

当前国内外有关立面生成方法的研究主要围绕两个方面:基于建筑要素的立面生成与性能驱动的立面表皮生成。前者依托现有案例,进行规则提取,从而生成立面图或三维模型。如 Wonka 等^[6]利用拆分语法自动构建立面并实现参数化控制;针对传统街区建筑立面更新问题,Tang 等^[7]基于粗糙集理论制定要素的组合规则,实现立面生成。后者则关注在前期设计阶段整合能耗、建造等约束。如 Gagne 等^[8]运用遗传算法探索了采光设计主导的立面生成。综上所述,既有研究少有从信息整合的视角出发,利用住宅平、立面的内在耦合关系生成立面模型,并集成相关的指标运算。此外,既往研究多采取底层开发独立工具的方式进行程序探索,灵活性强,自由度高,但其输入输出往往需要遵循一定的协议,以对接通用文件格式,互操作性较弱,导致这类工具与主流建筑设计软件之间存在较高的转换成本,因而限制了其应用及推广。

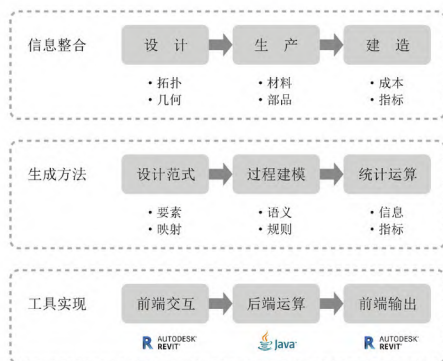


图1 研究思路

本研究着眼于高层住宅立面这一具体问题, 期望从信息整合、生成方法和工具实现三个维度(图1), 讨论高层住宅建筑信息的数字化描述及编码方式, 探索规则导向的建筑立面生成方法, 同时, 提出基于 Revit 平台和 Java 程序设计进行面向建筑师的工具开发的架构思路, 使得生成工具可以相对顺畅地嵌入到建筑师的工作流当中, 从而优化建筑信息管理方式, 促进数据整合与系统化集成设计的应用。

1 高层住宅立面设计的信息整合

在问题层面, 建筑工业化意味着设计、生产、建造各环节的数据共享和专业协作。而在方法层面, 生成设计是“对建筑的一种理性回归”^[9], 其基本的应用思路是从建筑学语境中, 提取定义相对明确、可编码的问题, 转化为合适的计算模型进行求解。不管是问题还是方法, 两者的基础都是确定简洁、有效、全面的信息协议。高层住宅立面设计问题, 不仅涵盖三维空间点、线、面等基本的几何图元数据, 更需要建立对高层次建筑学语境的数字化描述体系, 其中涉及从抽象到具体、从宏观到微观等一系列不同层面的数据, 以实现产业链的信息整合与集成。本研究引入层级式的描述方法对其进行编码。

1.1 建筑信息的数据表示

计算机中常见的三维数据表示方法(如 Mesh 网、体素、点云等)描述的主要是坐标、几何图元一类低语义层次的信息。许多主流的建模和绘图软件均采用此类存储方式, 导致了数据组织效率及信息整合度低的问题, 难以应对建筑学这一复杂系统中的学科问题。建筑模型除了基本的几何信息外, 通常还涉及大量多维度、多层级的信息, 如门窗、材料等具象要素, 平面功能的拓扑关系等抽象信息, 楼板厚度、栏杆间距等微观数据, 以及体形系数、窗墙比等宏观数据。因此, 以上表示方法并不能妥善解决高层次的建筑学语义描述问题, 遑论在设计阶段实现生产、建造信息的一体化管理。如今受到广泛关注的 BIM 技术, 则以 IFC^[1] 作为数据标准, 通过定义实体(Entities)、类型(Types)以及属性集(Property sets)实现对建筑工程的完整数字化表达, 来促进项目全

生命周期中各方数据的共享与交换^[10]。IFC 标准语义丰富, 但模型数据量大、数据结构复杂, 在现阶段仍存在各软件与 IFC 数据交互不一致的问题。

1.2 立面的层级式描述方法

本研究提取出立面生成涉及到的主要建筑信息, 采用层级式的系统化描述方法, 包含空间对象与对象布局^{[11]1968}, 覆盖点、线、面等抽象几何基类, 门、窗、栏杆等建筑构件, 以及要素组合规则等层面。高层住宅的一种常见设计范式是基于三段式划分, 推敲确定标准层平面后展开立面的深化设计。在此, 参考 Lee 等人^[12] 提出的基因型表示方式, 从“体量-标准层-开间-构件”四个递进层级(图2), 自上而下地对建筑立面进行描述。

体量层级记录了建筑的立面风格等宏观控制参数、平面图序列及对应标高等数据。标准层层级保留了建筑平面图中影响外立面生成的信息, 通过半边数据结构^[2]刻画抽象的拓扑关系(图3)。而在开间层面, 存储了其对应的内部功能以及拓扑上的相邻关系, 进一步地, 通过参数化描述方式记录门、窗、栏杆等构件信息, 建立数据间的关联和依赖, 以达到完善语义丰富度、整合建筑信息、高效访问及查询数据的目的。

2 高层住宅立面生成方法

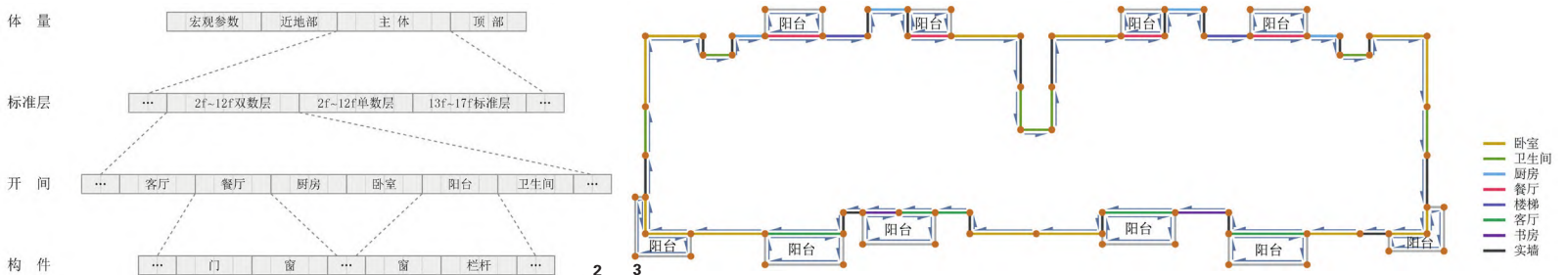
就高层住宅这一特定的建筑类型而言, 内部功能与使用需求相对固定, 立面往往遵循特定的设计范式。其形式与平面功能存在一定的映射关系。因此可将平面和建筑风格作为影响立面的主要因素, 继而对立面几何特征与组合规则进行抽取归纳。程序工具解析输入的建筑平面, 获取功能拓扑关系与几何图元信息, 然后遵循一定的建模逻辑生成立面。这种过程建模^[3]方法依赖预定义的一系列规则集, 用以描述构件组合的几何或语义信息^{[11]1969}。基于 1.2 中的表示方式, 每个层级预定义了平行的多条规则并统一转译、编码, 依靠各层级的规则重组来表示不同的立面结果。

2.1 高层住宅的典型立面模式

高层住宅设计问题有其功能限定的约束, 其立面设计也逐渐发展出了一些策略与模式, 包括三段式构成、

图2 层级式描述方法

图3 半边数据结构刻画的平面拓扑关系



风格化装饰等。现阶段,针对国内高层住宅的立面造型问题,已有较为系统的研究,涉及到风格类型、组织构图方式、构成要素等方面的总结。如李穗^[13]对当前国内城市高层住宅的立面形式进行了分类,包括 Art Deco 风格、现代风格等。张维昭^[14]从立面元素构成关系的视角,分析了高层住宅的立面表达。笔者^[15]基于构图规则选取了三种典型的立面组织模式:垂直型、水平型、网格型(图4),总结了体量关系、虚实比例、装饰处理等维度的特征,通过墙、板、构件的不同组合方式,塑造风格各异的立面形象。

2.2 基于规则的三段式立面生成

程序将立面模型拆分为顶部、主体和近地部,适用不同的形式规则进行生成。就主体标准层而言,针对输入的平面信息,计算机获取每个开间对应的内部功能,由此可以定义不同功能的界面虚实关系,选择合适的门洞或窗洞大小。进一步地,构件样式的选取则主要取决于风格、房间功能以及开间的面宽尺寸。根据输入端的风格类型,程序还将采取不同的元素和装饰处理手法,比如垂直型构图突出纵向装饰柱,水平型构图采用出挑楼板,以及一些细部的腰线和栏杆样式的变化等等。图5为同一套输入平面生成的不同立面模型,分别对应垂直型、水平型和网格型的构图规则。输出结果不仅包含具备可信细节的立面模型,更重要的在于,通过生成设计保留了大量的语义信息,使得设计数据脱离信息孤岛的状态,被有效组织和关联起来,成为可追溯、可索引的结构化数据,一方面使得方案设计的修改成本大大降低,另一方面也为建筑全生命周期的信息整合提供了可能性。

2.3 立面相关指标数据运算

生成立面模型的同时,程序工具可实时输出当前方

案的相关指标数据,辅助建筑师进行统筹规划设计。由于建立了信息编码和规则系统,从生成模型中可以挖掘出许多有效信息,在此归纳为三类:模型信息(长度、面积等)、性能指标(体形系数、窗墙比等)和建造数据(部品规格及数量、耗材等)。表1的输出数据来源于图5的立面生成结果。此外,为了更好地把控立面建造细节,相关的深化工作如排砖分缝也可进行自动化生成。如图6所示,程序可生成面砖铺贴方案,立面多采用横砖,在楼板及洞口上下边沿设置1~2匹竖砖对立面进行进一步划分,并确保砖缝与洞口对齐。同时,程序可识别角部砖、整砖、碎砖等类型,输出相应的规格及用量(表2)。在这套工作流程中,方案的指标数据运算被前置到设计初期,建筑师通过对经济技术指标等量化因素进行监测,推动方案的优化调整。从业者可通过进一步整合成本、造价等信息,深化各个产业环节、不同信息粒度的数据集成工作。

3 面向建筑师的信息集成与生成设计工具实现

面向建筑师的工具开发涉及到的一个关键问题是,该工具在设计工作中如何与上下游的数据形态进行对接和信息交换。前后环节的数据匹配也是众多底层开发的独立工具的痛点所在,这导致独立程序往往需要实现对常见通用格式的解析与输出功能,或者要求输入端遵循一定的文件协议,如此,用户不得不付出额外的平台转换成本。

本研究选择依托 Revit 生态作为前端,结合 Java 程序设计进行生成工具的开发。其主要原因如下:1) Revit 是目前主流的 BIM 软件之一,通用性较强,互操作性佳,便于不同维度不同阶段的信息整合,生成工具集成到这

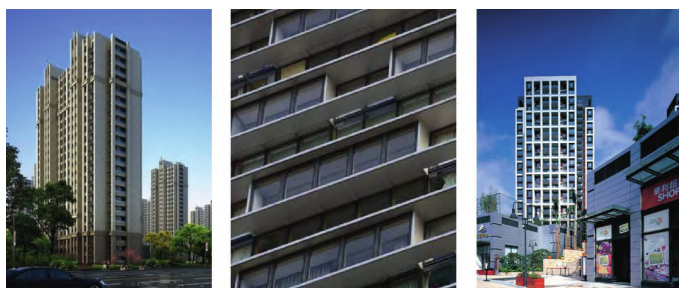


表 1 立面相关的部分指标数据输出

立面类型		垂直型	水平型	网格型
窗墙比	北向	0.383	0.474	0.497
	东西	0.072	0.073	0.073
	南向	0.344	0.472	0.469
体形系数		0.303		
栏杆长度/m		967.2		

表 2 面砖规格及用量

面砖规格/mm×mm	用量/匹
150×50	528
100×50	2530
100×50(45°角横砖)	352
100×50(45°角竖砖)	12
总计	3422

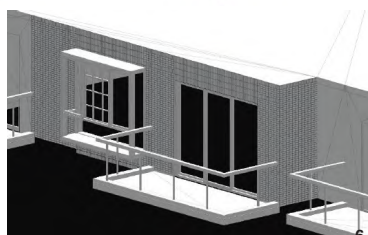


图 4 垂直型、水平型、网格型构图规则

图 5 不同规则下生成的立面

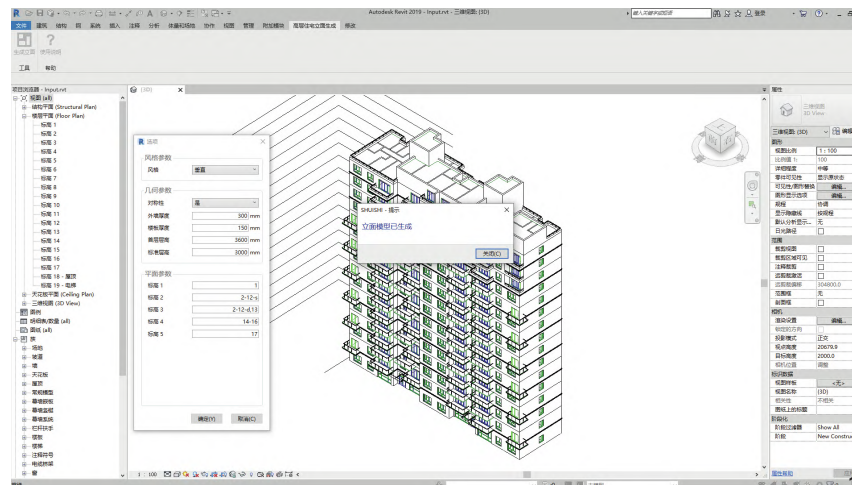
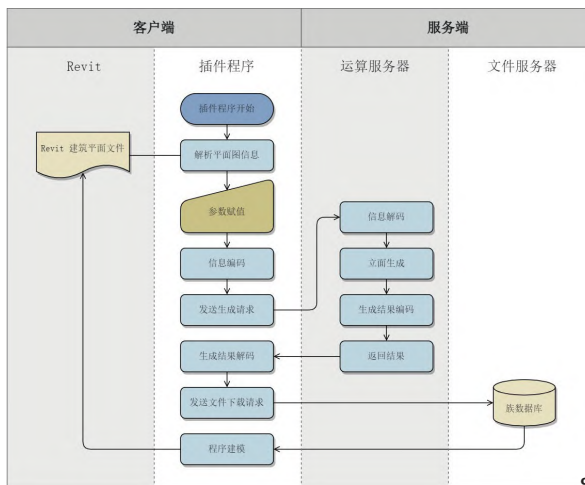
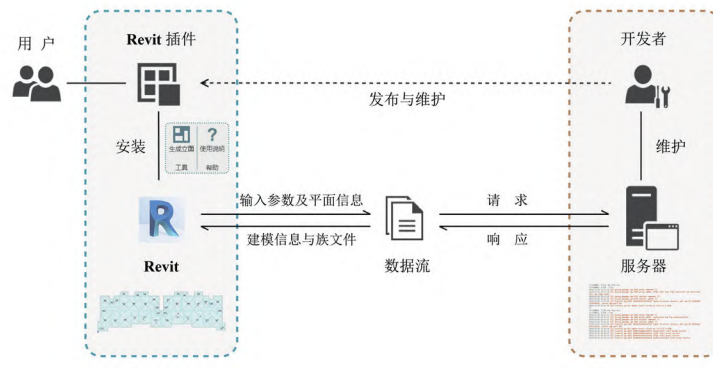
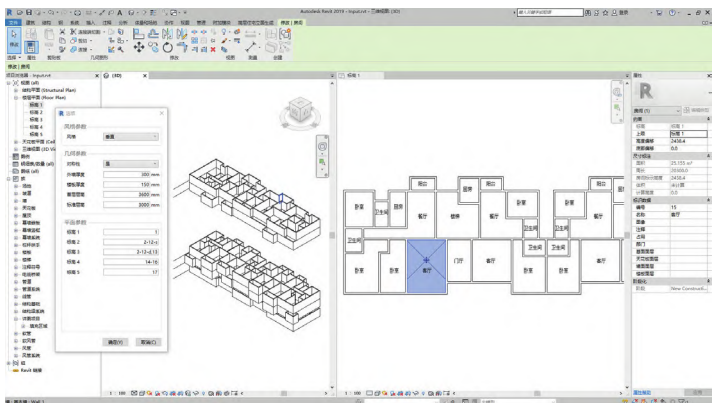
图 6 排砖分缝的自动化生成

一平台后也将具备更好的传播性与便利性; 2) Revit 建筑模型的数据结构基于 IFC 标准, 具备非常详细的建筑语义学信息, 这对于建筑的数字化描述和抽象表示有着重要意义; 3) Revit 提供了完整的 API, 有着较完备的开发文档与编程接口, 其开发环境允许使用者通过任何与 .NET 框架兼容的语言进行二次开发, 保留了一定的灵活性, 可开发性较强; 4) Revit 的“族”概念架构提升了构件的可重用性, 有利于构件库的适配与扩展。

3.1 基于 Revit API 二次开发的前端交互插件

本生成工具将 Revit 插件作为前端, 承担用户交互、输入数据、显示渲染等功能。藉由 Revit 平台完善的信息集成机制和成熟的交互设计, 建筑师的输入操作得到了极大的简化。用户在不同标高中绘制相应的平面拓扑关系, 并在围合区域内标记房间, 房间名称为功能(图 7)。插件自动获取与外立面生成相关的房间数据, 如立面开间对应的内部功能、房间邻接关系等等, 提取出如图 3 所示的抽象信息。在交互界面(图 7), 输入端需提供三个部分的参数: 1) 风格参数, 即预定义的不同建模规则; 2) 几何参数, 平面对称性、墙厚、楼板厚度及层高; 3) 平面参数, 将不同楼层与文档中的标高平面对应起来, 指定每个平面适用的楼层。完成后即可向服务器发送运

图 7 平面信息输入形式
图 8 主从式架构示意图
图 9 程序流程泳道图
图 10 运算完成界面



算请求。

3.2 基于 Java 底层实现的后端运算程序

通过 Java 语言实现第 2 节所述的生成设计程序, 并打包为可执行 JAR 文件在后端服务器上持续运行, 承担处理不同的输入数据、运算和输出结果的作用。同时, 服务器中存储了预定义的构件库(门、窗、栏杆、轮廓等 Revit 族文件)以及相关编码信息, 可用于网络通信传输, 提供给客户端进行下载。

3.3 生成工具的主从式架构设计

生成工具的开发采用了主从式架构⁴⁾, 即客户端和服务器通过网络进行通信(图 8)。本地客户端主要完成交互、建模以及显示的工作, 服务器进行过程建模运算以及构件库的存储。这一架构的优势在于, 其一, 轻量级的客户端对本地资源占用极小, 大量运算由服务器完成, 运行效率更高; 其二, 工具的维护更为便利, 对于构件库和规则系统的更新, 开发者通过完善服务器的后端运算程序即可, 通常不需要频繁对客户端进行维护。

插件的工作流程(图 9)为: Revit 端插件程序提取和处理建筑平面信息, 收集用户输入参数, 向服务器发送请求; 服务器响应, 完成运算后返回结果; 客户端解析数据流并从文件服务器构件库中下载对应的门窗、

轮廓等 Revit 族文件，最终在本地文档中进行建模（图 10）以及相关指标数据的运算。工具可实现 2.3 节所述三种构图规则下的立面模型生成及指标输出，并在服务器端搭建了相应风格样式的 Revit 族数据库，包含栏杆、门、窗、腰线等细部构件。随着项目的积累，可进一步整合不同规格的部品信息，扩大数据库规模。全流程的数据交互较为平滑，用户获得的输出结果是一个符合 IFC 规范的 Revit 模型（图 11），可进行平台上的其他后续操作，具备较好的可编辑性和结构化的数据组织模式。

在实际生产中，面向工业化的生成工具的实现需要产业上下游的协同配合，构建与物质化实现过程对应的完整数字链（图 12），推动标准化设计 - 自动化生产 - 装配化施工的一体化建造体系。一方面，设计师需要基于经验与直觉提取设计范式，归纳相关的生成规则，以便将更多的项目经验编码为程序标准化流程；另一方面，制造者与供应商应参与到数据平台的完善工作中来。除门窗等基本部品外，还应将预制混凝土构件（如预制楼梯、预制保温墙板）等高度集成化的产品纳入数据库中，将规格化的构件生产体系转化为共享数字资产，以便建筑师统筹全流程，从而实现生产可控、施工可控的系统化集成设计。

结语

本研究着眼于高层住宅立面问题，在新型建筑工业化与系统化集成设计的背景下，从信息整合、生成方法和工具架构三个方面展开理论与编程实践。在语义丰富度和简洁性的权衡中，通过定义层级化描述方法，编码特定问题中的建筑信息；探讨了基于规则系统的立面生成方法，实现了特定的立面模式在不同方案中的快速重用；并且，搭建了构件族数据库，在方案前期阶段

整合部分指标和建造相关数据，辅助设计师进行立面造型设计，同时也为产业信息集成提供了一种技术路径。研究采用主从式架构设计的策略，依托主流 BIM 软件 Revit 平台进行二次开发，初步实现了面向建筑师的信息整合与生成设计插件，探索了底层开发的程序工具在 BIM 生态中的介入形式以及提升用户化程度的推广方法。目前来看，本研究尚存在以下问题值得探讨：1）建筑业的信息化和自动化程度尚低，行业的信息整合需要上下游从业者的通力合作。建立各个环节产业数据的数字化描述、深化推广统一的信息协议与数据标准仍有诸多挑战，例如装配式建筑从设计到拆板的整合问题等；2）基于规则系统的生成方法往往是自上而下的，程序执行一套确定的逻辑判断处理不同的输入情形。本研究中的算法模型简化了生成规则，主要围绕平面功能信息进行编写，许多立面设计影响要素如场地、文脉、气候等未能纳入考虑。该方法依赖于规则的提炼和制定，在发展和更新方面存在一定的局限性。在进一步的研究中，一个可探索的方向是，用户通过客户端上传建筑样例，后端程序运用概率方法进行推断和学习的生成机制^[16]。

总体而言，新型建筑工业化发展与联合国提出的“住宅产业化”的 6 条标准相一致。依托数字技术和生成设计方法，行业上下游应协同整合建筑全生命周期信息，包括设计范式、构件体系、建造标准等等，积累行业数字化资产，打通各环节的信息对接工作，实现建筑项目的信息共享以及设计 - 建造一体化流程中的数据连续性。建筑师在工业化思维的指导下，通过前期的信息集成设计，强化对生产和建造阶段的把控，为产业链下游提供良好的结构化数据基础，由此降低方案修改及交接成本，提升建设质量和效率，从而推动建筑业全面转型升级。■

图、表来源



图 11 生成结果

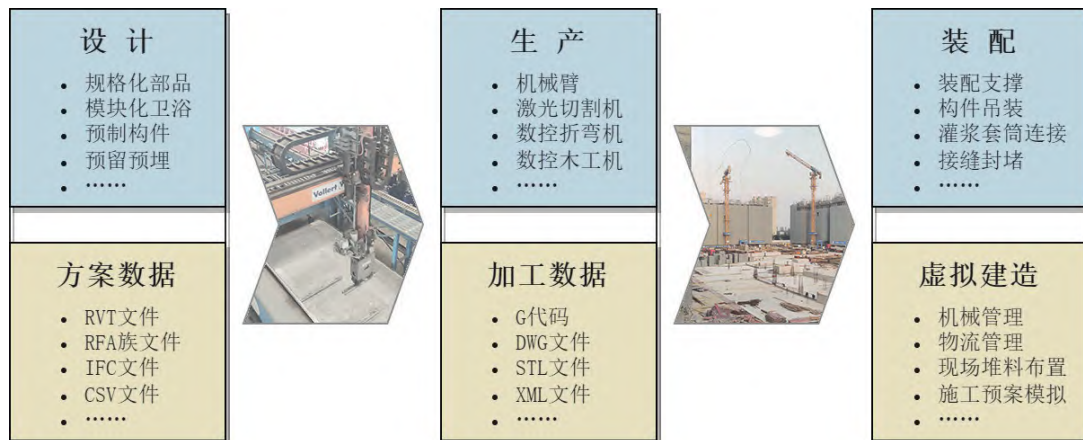


图 12 建筑工业化的物质化实现及数字链

图1、2、3、8、9、12: 作者绘制;

图5、6、7、10、11: 作者编写程序生成;

图4: 参考文献[13];

表1、2: 作者编写程序生成。

注释

1) IFC (Industry Foundation Class) 数据模型旨在描述建筑行业数据, 是由 buildingSMART International 发布的一种开放文件格式规范。

2) 半边数据结构 (Half-Edge Data Structure) 是一个以网格有向边为基础的数据结构, 包含的主要元素为顶点、半边和面片, 多用来处理邻近查询等问题。

3) 过程建模 (Procedural Modeling) 是指通过过程设计和过程定义来建立模型。

4) 主从式架构 (Client-server model), 也称 C/S 架构、客户端 / 服务器架构。每一个客户端实例均可向服务器发出请求, 服务器处理请求并传回结果。

参考文献

[1] 朱姝妍, 马辰龙, 向科. 优化算法驱动的建筑生成设计实践研究 [J]. 南方建筑, 2021(1):7-14. DOI:10.3969/j.issn.1000-0232.2021.01.007.

[2] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部等部门关于加快新型建筑工业化发展的若干意见 [EB/OL]. [2021-08-31]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/04/content_5540357.htm. Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Several Opinions of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development and Other Departments on Accelerating the Development of New Industrialized Building [EB/OL]. [2021-08-31]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/04/content_5540357.htm.

[3] 李飏, 郭梓峰, 李荣. “数字链”建筑生成的技术间隙填充 [J]. 建筑学报, 2014(8):20-25.

LI Biao, GUO Zifeng, LI Rong. Filling in the Technical Gap Generated by Digital Chain Architectural Design [J]. Architectural Journal, 2014(8):20-25.

[4] 徐鹏鹏, 王珺, 刘贵文, 等. 我国建筑工业化中设计标准化存在的问题与对策探讨 [J]. 建筑经济, 2018, 39(3):5-8.

XU Pengpeng, WANG Jun, LIU Guiwen, et al. Discussion on the Problems and Countermeasures of Design Standardization in China's Construction Industrialization [J]. Construction Economy, 2018, 39(3):5-8.

[5] Müller P, Wonka P, Haegler S, et al. Procedural modeling of buildings [M] // ACM SIGGRAPH 2006 Papers. 2006:614-623.

[6] Wonka P, Wimmer M, Sillion F, et al. Instant architecture [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2003, 22(3):669-677.

[7] Tang P, Wang X, Shi X. Generative design method of the facade of traditional architecture and settlement based

on knowledge discovery and digital generation: a case study of Gunan jie Street in China [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2019, 13(5):679-690.

[8] Gagne J, Andersen M. A generative facade design method based on daylighting performance goals [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2012, 5(3):141-154.

[9] 华好, 李飏, 卢德格尔·霍夫施塔特. 运算化住宅设计——从科研到教学 [J]. 新建筑, 2018(4):34-38.

HUA Hao, LI Biao, Ludger HOVESTADT. Computational Residential Design: From Academic Research to Design Studio [J]. New Architecture, 2018(4):34-38.

[10] 赖华辉, 侯铁, 钟祖良, 等. BIM 数据标准 IFC 发展分析 [J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1):126-133.

LAI Huahui, HOU Tie, ZHONG Zuliang, et al. Analysis on Development of BIM Data Standard IFC [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(1):126-133.

[11] 李尚林, 谢文军, 李琳, 等. 计算机快速建筑建模方法综述 [J]. 计算机学报, 2019, 42(9):1966-1990.

LI Shanglin, XIE Wenjun, LI Lin, et al. Computer Rapid Modeling Methods of Architecture: A Review [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(9):1966-1990.

[12] Lee M, Lee J H. Form, Style and Function—A Constraint-Based Generative System for Apartment Façade Design [J]. 2006.

[13] 李穗. 当代城市高层住宅建筑立面形式设计研究 [D]. 长春: 长春工程学院, 2019.

LI Sui. Study on the Design of Façade Forms of Contemporary Urban High-rise Residential Buildings [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2019.

[14] 张维昭. 当前国内高层住宅立面设计探索的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.

ZHANG Weizhao. Research on the Exploration of the Façade Design of High Residence in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.

[15] 吴佳倩, 李飏. 基于规则的高层住宅立面生成方法初探 [J]. 共享·协同——2019 全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集, 2019:112-120.

WU Jiaqian, LI Biao. Research on Generative Method of High-rise Residential Façade Based on Rules [J]. Sharing Collaboration: Proceedings of 2019 National Conference on Architecture's Digital Technologies in Education Research, 2019:112-120.

[16] Sönmez N O. A review of the use of examples for automating architectural design tasks [J]. Computer-Aided Design, 2018, 96:13-30.