

真实建造数据驱动的装配式建筑构件智能优化设计研究

罗佳宁¹, 檀洋林², 颜凌杰², 曾涵旻²

摘要: 装配式建筑设计通常在早期设计阶段就要求设计结果达到一定的广度、深度和精度, 然而目前以经验驱动的建筑设计仍存在深化设计盲区和错误, 较难准确匹配和直接指导真实建造。随着智能建造的飞速发展, 装配式建筑设计的可重复特征使得以数据驱动建筑设计存在可能。以加拿大不列颠哥伦比亚大学 Orchard Commons 和 Brock Commons 学生公寓为例, 深入探讨如何以设计建造一体化为切入点, 提炼真实建造数据, 推导设计约束条件, 并通过 BIM 参数化智能工具开展墙板构件的智能优化设计。最后结合 DFMA 理念提出真实建造数据驱动的建筑构件智能优化设计插件架构与设想, 以期探索建筑师融合智能工具的装配式建筑设计新范式。

关键词: 真实建造数据; 数据驱动; 装配式建筑; 智能优化设计; 深化设计

Keywords: Real Construction Data; Data-Driven; Prefabricated Buildings; Intelligent Optimization Design; Detailed Design

基金资助: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52008203); 江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX24_1597)

引言

目前, 建筑行业正处于新型建筑工业化与智能建造协同发展的转型期, 数字设计工具如 BIM, 参数化设计、Python 等的广泛应用推动了传统建筑业向数字化和智能化方向的转变, 推动了全产业链的转型与升级^[1]。智能建造是以智能技术为核心的现代信息技术与以工业化为主导的先进建造技术深度融合, 核心在于通过数据驱动整个建筑过程, 从工程勘察到设计、生产、施工及交付, 实现建造活动的自感知、自学习、自决策和自控制^[2]。数据驱动指的是利用实时收集的数据信息来优化建筑设计和施工流程^[3], 而不仅仅是依赖于传统设计中的经验和直觉。

传统建筑设计的决策和推进通常依赖建筑师的专业能力和设计经验, 是以经验驱动的, 而装配式建筑区别于传统建筑设计的个性化定制, 主要采用建筑标准化设计方法以实现预制构件“少规格, 多组合”的基本原则。因此其设计结果在后续应用执行的真实建造过程中通常应用统一的连接方式和可重复的装配步骤, 这些与之相关的真实建造细节能够被提炼转化为真实建造数据, 积累的“标准化”信息在住宅建筑或办公建筑等需要大量重复、模块化空间的建筑类型中能够同时为多个相似装配式建筑案例的标准化设计结果提供量化的数据支持, 这些可重复性特征和对真实建造数据的依赖性使得装配式建筑与智能建造存在的紧密联系^[4]。

装配式建筑设计通常在早期设计阶段就要求设计结果达到一定的广度、深度和精度, 然而目前以经验驱动的传统建筑设计方式仍存在深化设计盲区和错误, 较难准确匹配和直接指导真实

¹ 罗佳宁 (✉), 南京工业大学建筑学院, 副教授, luo.jianing@njtech.edu.cn

² 檀洋林, 颜凌杰, 曾涵旻, 南京工业大学建筑学院, 硕士研究生

建造，并不适用于装配式建筑设计。而真实建造数据的引入能够有效应对这一问题，例如能够支持构件的标准化制造和装配，从而实现高效和质量控制^[5]。此外，目前以经验驱动的传统建筑设计方法，真实建造数据通常生成于设计完成之后作为记录和审计使用，不直接影响设计优化，较难引导早期设计结果准确匹配和直接指导真实建造，因此，经验驱动容易造成设计与建造之间的脱节，使得现场调整和返工变得常见^[6]。而装配式建筑由于其可重复的特征，能够将这些真实建造数据直接反馈给早期设计阶段，以提升设计结果的广度、深度和精度。在本文装配式建筑设计的语境中，真实建造数据为从实际建造阶段中采集和提炼的、与建筑深化设计有关联的并且能够影响设计决策的各类信息，例如建造现场图片、与建造现场相匹配的图纸、模型、工程记录等。这使得用数据驱动装配式建筑深化设计成为可能，通过持续的数据反馈循环，结合智能化设计工具可以持续优化设计模型和施工效率^[7]。

本文依托第一作者的基金课题和研修项目^①，以加拿大不列颠哥伦比亚大学 Orchard Commons 学生公寓（图 1）和 Brock Commons 学生公寓为例^②（图 2），分别以预制混凝土复合墙板、预制木结构复合墙板作为研究对象，以设计建造一体化为目标，真实建造需求为导向，从应用 BIM 参数化智能工具解装配式建筑构件深化设计盲区和错误问题的角度，通过真实建造数据提炼、设计约束条件推导、BIM 参数化智能工具应用演示，分析了 Orchard Commons 学生公寓案例中墙板连接点位置的具体智能优化设计方法和 Brock Commons 学生公寓案例中 BIM 模型的具体智能优化设计方法，最后探讨了基于真实建造数据的 BIM 参数化智能优化设计工具的软件架构和设想（图 3）。以为当下与未来中国装配式建筑新型工业化设计与智能建造协同发展的研究和实践提供人工智能和计算性设计方面的借鉴和启示。



图 1 Orchard Commons 学生公寓建成图（图片来源：<https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/orchard-commons/>），图 2 Brock Commons 学生公寓鸟瞰图（图片来源：<https://www.naturallywood.com/>）

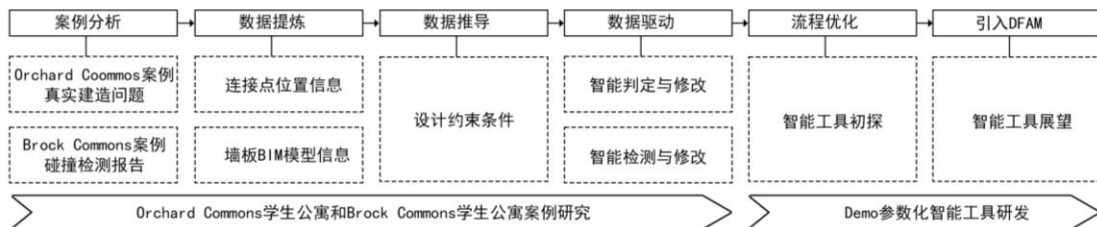


图 3 论文框架图（图片来源：作者自绘）

1. 真实建造数据驱动的建筑墙板连接点位置智能优化设计

1.1 基于建造数据的数据提炼与设计约束条件推导

Orchard Commons 学生公寓位于加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC）温哥华校区，建筑分为南塔和北塔，主体部分为 18 层的学生公寓，裙房部分包含餐饮、教学、交流等功能。建筑占地面积 15036 m²，高度 58.87m。建筑主体结构采用钢筋混凝土结构系统，建筑立面应用了装配式

建造技术，通过预制混凝土复合墙板形成“丝带”形状的非线性建筑立面设计风格，建筑师在初始方案的基础上应用 Rhino+Grasshopper 参数化设计工具通过墙板 BIM 构件的参数量化控制建筑立面中的曲线变化，最终将建筑立面上总计 1205 块预制墙板的尺寸类型从 90 种减少至 18 种 [8]，有效地降低了模具制造的工作量，减少了预算成本。

然而在墙板的真实建造过程中，仍存在大量问题，作者在对施工现场取样到的典型 31 块预制墙板的建造数据的采集和统计中发现，其中连接错位问题的发生概率占到 29%，问题展示如图 4 (a)。其根本原因是建筑师在方案设计阶段虽减少了墙板的外轮廓尺寸类型，但在墙板的深化设计阶段并没有充分考虑预制墙板连接点位置与建筑主体结构部分可能产生的冲突碰撞，存在深化设计盲区和错误，连接点位置多依赖于制造商经验进行手工调整，并未专门设计。这导致了预制墙板与建筑主体结构之间存在 34 种不同的连接点位置类型 [8]。

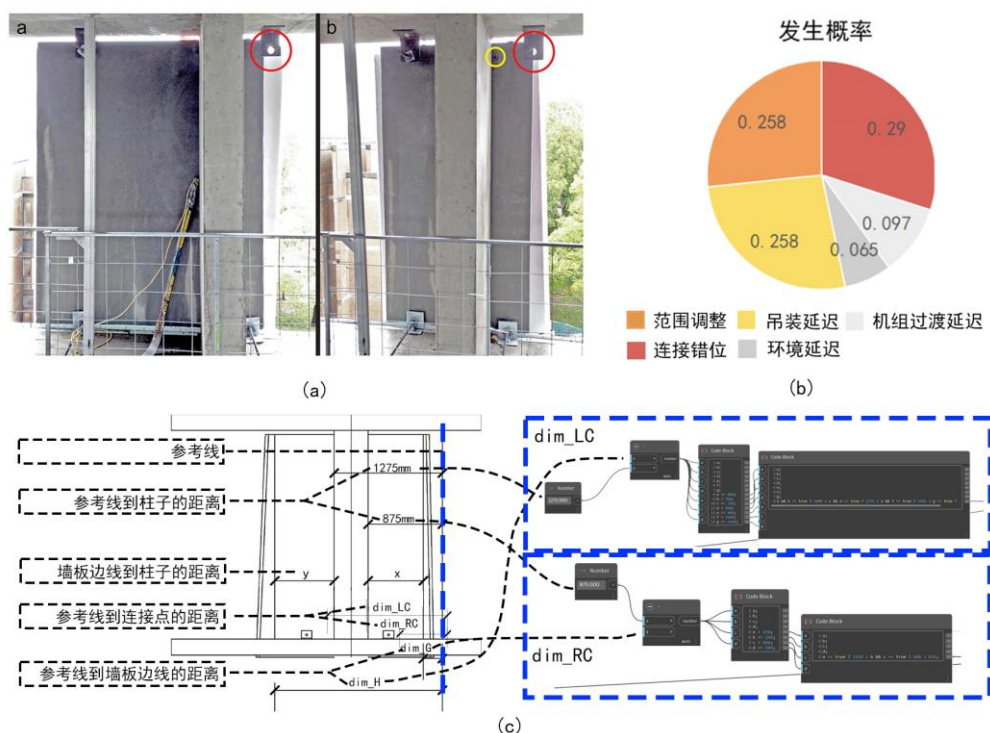


图 4 (a)连接错位问题现场照片；(b) 连接错位问题发生概率分析；(c) 设计约束条件推导 (图片来源: a Shahrokhi, H. (2016). Understanding how advanced parametric design can improve the constructability of building designs (T). University of British Columbia. Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0308669> , b、c 作者自绘)

针对上述问题，依据现场反馈的真实建造问题，结合 BIM 模型、施工图等提炼了真实建造数据，推导设计约束条件，并以连接点位置类型的最少化作为智能优化设计目标。具体为：如图 4 (b)、4 (c) 所示，在墙板的 BIM 模型中，新增了两个参数 dim_LC 和 dim_RC ，以定义墙板连接点位置到参考线的距离。同时，结合 BIM 墙板构件模型中参考线到柱子的距离 (875mm、1275mm)、参考线到墙板边线的距离 (dim_G 和 dim_H) 等，推导设计约束条件墙板边线到柱子的距离 (假设为 x 、 y)。 dim_RC 由每块墙板右侧边线与柱子之间的距离 x ($x=875\text{mm}-dim_G$ 得出) 所在区间决定的，例如，在 $x \geq 500$ 时， $dim_RC=635\text{mm}$ ；在 $x < 150$ 时， $dim_RC=1350\text{mm}$ ；在 $150 \leq x < 500$ 时， $dim_RC=800\text{mm}$ 。同样，在 dim_LC 的取值中，由每块墙板左侧边线与柱子另一侧的距离 y 所在区间决定 ($y=dim_H-1275\text{mm}$ 得出)，例如，在 $600 \leq y < 750$ 时， $dim_LC=1600\text{mm}$ ；在 $750 \leq y < 950$ 时， $dim_LC=1775\text{mm}$ ；在 $950 \leq y < 1150$ 时， $dim_LC=1935\text{mm}$ ；在 $y \geq 1150$ 时， $dim_LC=2125\text{mm}$ ，具体 x 、 y 的区间与 dim_LC 和 dim_RC 的取值如表 1 所示。

表 1 基于真实建造数据的设计约束条件推导与设计约束值

设计约束条件	智能判定区间 x	设计约束值 dim_RC	智能判定区间 y	设计约束值 dim_LC
墙板边线到柱子之间的距 离不能够安装连接构件	$x < 150$	1350mm	$600 \leq y < 750$	1600mm
墙板边线到柱子之间的距 离能够安装连接构件	$x \geq 500$	635mm		
墙板边线到柱子之间的距 离能够安装连接构件且构 件在墙板范围内	$150 \leq x < 500$	800mm	$750 \leq y < 950$ $y \geq 1150$	1775mm 2125mm

1.2 Orchard Commons 墙板连接点位置的智能判定与修改

基于表 1 的设计约束条件（值），应用 Dynamo 工具对 BIM 墙板构件模型进行连接点位置的智能判定和修改，以实现连接点位置类型最少化的智能优化设计，最终从 34 种减少到 7 种。

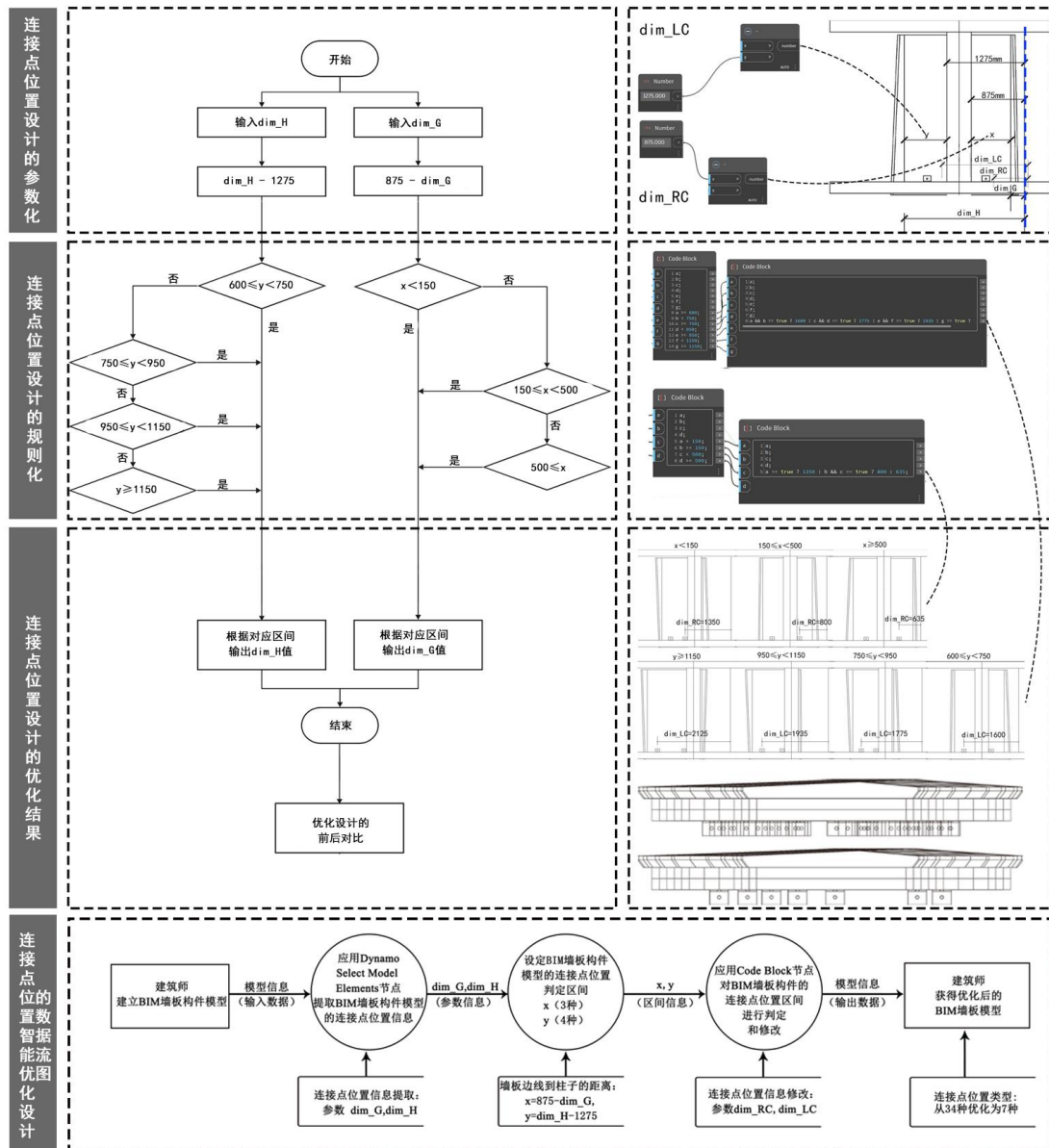


图 5 墙板连接点位置参数的智能判定与修改（图片来源：作者自绘）

如图 5 所示，建筑师建立 BIM 墙板构件模型（输入数据），应用 Select Model Elements 节点提取 BIM 墙板构件模型中的连接点位置参数信息（dim_G，dim_H），然后依据墙板边线到柱子的距离（ $x=875-\text{dim}_G$ 、 $y=\text{dim}_H-1275$ ）的 7 种判定区间，应用 Code Block 节点对墙板连接点位置到参考线的距离（dim_LC 和 dim_RC）进行智能判定和修改，最后建筑师获得优化后的 BIM 墙板模型（输出数据）。具体可分为三个步骤：

1. 连接点位置设计的参数化：将连接点位置设计参照的依据转化为参数，以 Number 和 Subtract 模块计算每块墙板的 x、y 值；

2. 连接点位置设计的规则化：以函数模块 Code Block 编写按照 x 和 y 所代表距离划分的判定约束条件区间；

3. 连接点位置设计的优化结果：以函数模块 Code Block 编写针对不同区间所对应的 dim_RC 和 dim_LC 值，每块墙板根据自身 x、y 值所在的区间确定 dim_RC 和 dim_LC 即优化后的连接点位置。

2. 真实建造数据驱动的建筑墙板 BIM 模型智能优化设计

2.1 基于碰撞检测的数据提炼与设计约束条件推导

加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC）温哥华校区的 Brock Commons 学生公寓是一座创新性的混合木结构高层建筑，于 2017 年完工时成为全球最高的木结构建筑。在该项目的设计和建造过程中，应用了虚拟设计与建造（Virtual Design and Construction, VDC）技术。VDC 结合了 BIM 技术等先进技术，通过虚拟模型模拟装配式建筑的实际建造过程，推进设计协同目标，提前发现并解决建造中可能遇到的各种问题，从而提高设计效率和质量。然而在项目的设计协同过程中，项目团队使用 Navisworks 软件对虚拟模型进行了碰撞检测，生成了两份报告，累计发现 113 处冲突，其中 29 处涉及建筑专业，主要问题为 BIM 模型信息不足和信息错误（图 6）。这些冲突的产生原因在于：一是 BIM 墙板构件模型中缺乏必要的真实建造数据，如厚度、高度等尺寸信息，导致深化设计存在盲区；二是 BIM 模型中各专业间的真实建造数据不一致，导致深化设计出现错误。这意味着建筑师在前期设计阶段需要充分考虑建筑及其构件的真实建造数据，并在设计成果（BIM 模型）中准确反映，以确保 BIM 模型的完整性和精确性，精准传递设计意图，指导后续的真实建造过程。



图 6 (a) 项目设计协同过程中产生的碰撞检测报告；(b) BIM 模型中各类冲突问题占比
(图片来源：a UBC BIM TOPiCS Lab 提供，b 作者自绘)

因此，针对上述问题，以 BIM 墙板构件模型中与尺寸相关的真实建造数据的完整性和精确性为优化目标，如长度、宽度和高度等。研究选取了 Brock Commons 学生公寓案例中使用数量最多、最典型的预制木结构复合墙板构件，具体以 BIM 墙板构件模型作为研究对象（图 7），推

导出其中竖向龙骨 ST1 尺寸的设计约束条件，为智能设计优化的实施提供了数据驱动的基础。具体为分析预制木结构复合墙板构件的设计与真实建造数据，包括工程图纸、模型、工程记录、现场照片和访谈记录等。墙板构件由墙板结构、外围护层和内围护层组成，整体尺寸为 8000*2810*285mm。其中，墙板结构由轻钢龙骨框架和轻质木圈组成（子构件），包括竖向龙骨（如 ST1、ST2、ST3）、横向龙骨（T101、T102）及木圈 W1 和 W2，尺寸为 8000*2778*152mm。因此，ST1 作为竖向龙骨构件，其尺寸和形状受到各子构件的限制，例如 ST1 高度的真实建造数据的推算如下：轻钢龙骨框架高度（2778mm）减去横向木圈厚度（38mm）和上下横向轻钢龙骨厚度（3*2mm）推动出 ST1 高度为 2734mm。同理，其宽度、长度和厚度分别为 38mm、146mm 和 3mm。因此，竖向龙骨 ST1 在 BIM 墙板构件模型中的设计约束条件为：“长度(SL)=2734”、“宽度(SW)=38mm”、“高度(SH)=146mm”、“厚度(ST)=3mm”。

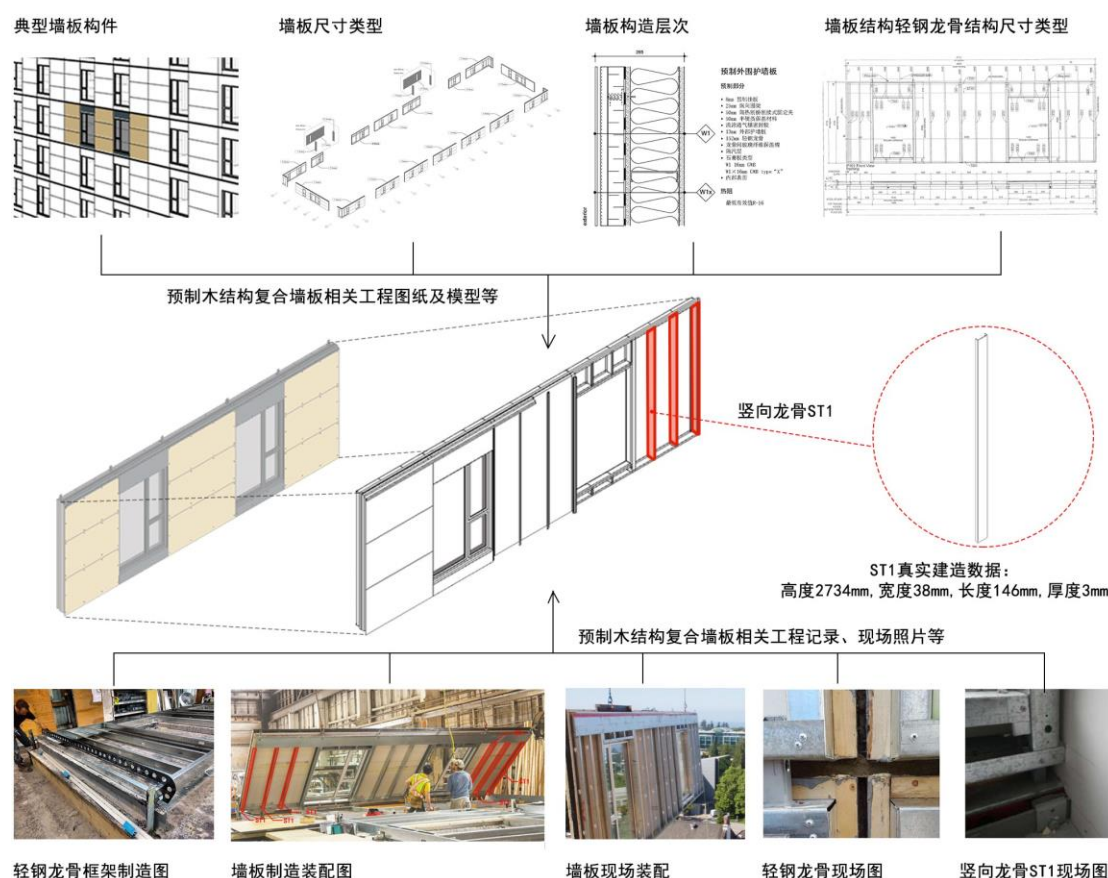


图 7 预制木结构复合墙板构件分析（图片来源：基于 UBC BIM TOPICS 团队提供的照片，作者自绘）

2.2 Brock Commons 墙板 BIM 模型的智能检测与修改

为了在设计前期避免出现 BIM 模型信息不足、信息错误错误等问题，基于上述推导出的竖向龙骨 ST1 设计约束条件（值），应用 Dynamo 工具对 BIM 墙板构件模型进行竖向龙骨 ST1 的长度（SL）、宽度（SW）、高度（SH）和厚度（ST）参数信息完整性验证和精确验证及优化。如图 8 所示，建筑师建立 BIM 墙板构件模型（输入数据），应用 Select Model Elements 节点提取 BIM 墙板构件模型中的竖向龙骨尺寸参数信息（SL、SW、SH 和 ST）、竖向龙骨材料属性信息和建筑层高（标高）参数信息，然后应用 PythonScript 节点和 if 循环语法进行竖向龙骨 ST1 的完整性和精确性的智能检测与修改，最后建筑师获得优化后的 BIM 墙板模型（输出数据）。具体可分为五个步骤：

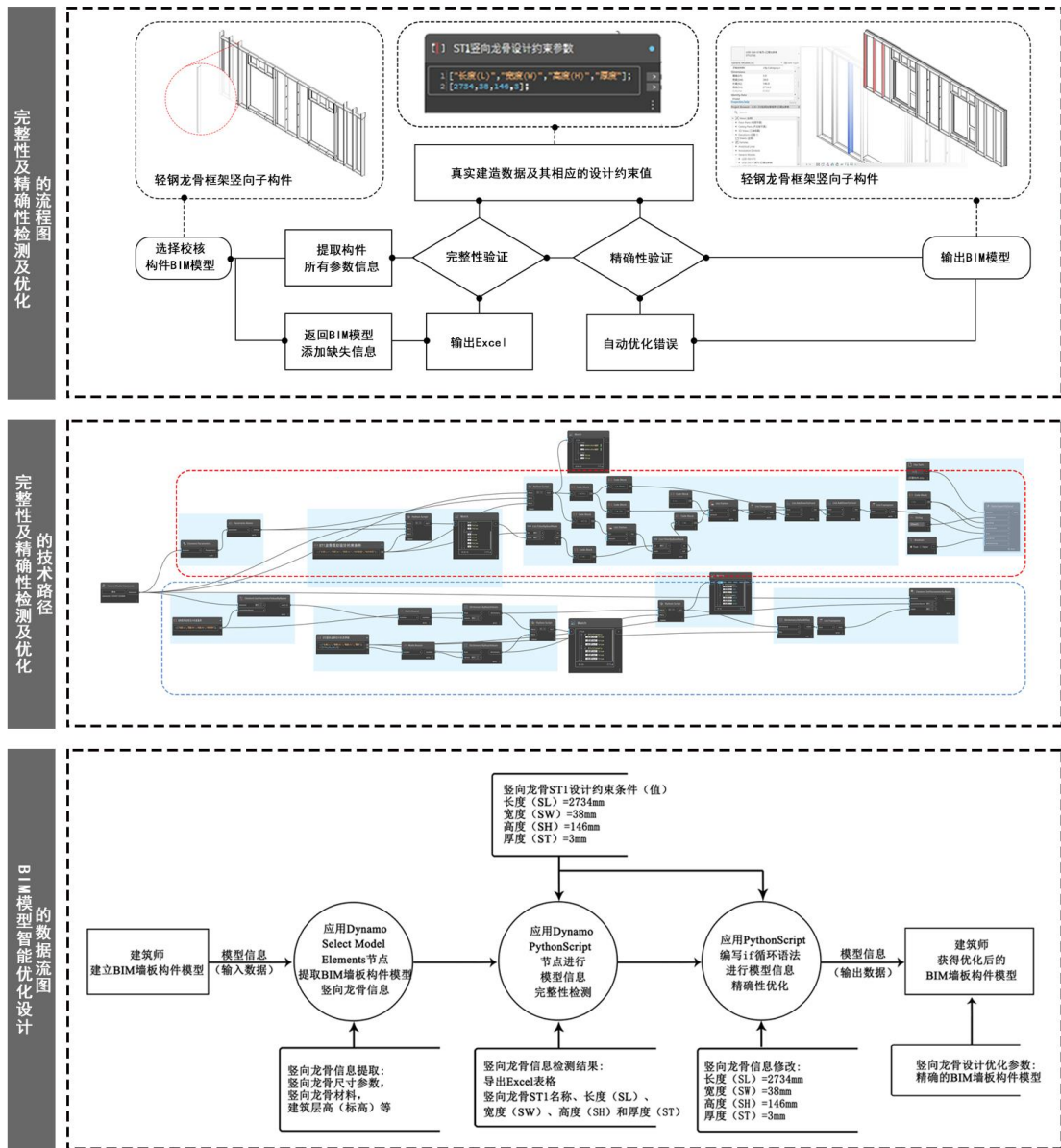


图 8 墙板竖向龙骨 ST1 关键建造参数的智能检测与修改 (图片来源: 作者自绘)

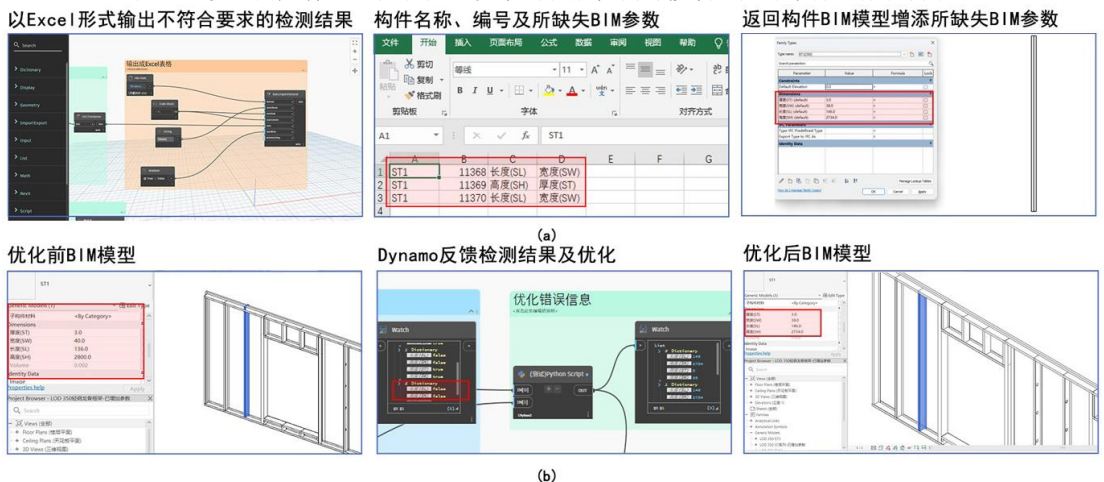


图 9 (a) 完整性检测优化结果; (b) 精确性检测优化结果 (图片来源: 作者自绘)

1、选择待检测的 BIM 墙板构件模型: 在 BIM 模型中批量选择需要检测的墙板构件, 使用 Element.Parameters 和 Parameter.Name 两个节点获取构件模型中包含的所有 BIM 参数;

2、选择真实建造数据的设计约束条件：输入与构件真实建造数据对应的设计约束条件，根据前述分析，竖向龙骨 ST1 的设计约束条件为“长度 (SL)=2734mm”、“宽度 (SW)=38mm”、“高度 (SH)=146mm”、“厚度 (ST)=3mm”；

3、完整性检测：通过 PythonScript 节点，依据设计约束条件使用 Python 编程脚本对 BIM 墙板构件模型中的 BIM 参数进行循环检测。Python 脚本通过 if 循环语法检测每个参数是否存在，并输出布尔值结果。接着，应用 PythonScript 节点精准提取缺失参数的构件名称、编号及 BIM 参数，并将结果输出为 Excel 表格，便于高效处理和直观展示缺失的真实建造数据；

4、完整性优化：根据实际建造要求在 Excel 表格中添加相应的参数，并返回至 BIM 模型中。如图 9 (a) 所示，竖向龙骨 ST1 构件缺少的 BIM 参数包括“长度 (SL)”、“宽度 (SW)”、“高度 (SH)”和“厚度 (ST)”。根据这些反馈，将缺失参数添加回 BIM 模型，确保构件的真实建造数据完整；

5、精确性检测及优化：在确保 BIM 模型数据完整后，依据步骤 2 中的精确性检测条件，再次使用 PythonScript 节点和 if 循环语法，检测 BIM 参数是否符合设定条件。检测结果以布尔值呈现，若发现参数不一致，则使用 PythonScript 节点对不符合条件的 BIM 参数进行批量优化，快速调整参数值，如图 9 (b) 所示。

3. 基于真实建造数据的 BIM 参数化智能优化设计工具初探

3.1 BIM 参数化智能优化设计插件工具界面

建筑师在装配式建筑深化设计中面临挑战，深化设计对设计结果的广度、深度和精度要求较高，是复杂而又系统的设计工作，通常存在大量的重复性设计工作。那么目前人工智能能否与 BIM 参数化设计工具结合，以替代建筑师重复工作，以辅助建筑师准确和高效的完成深化设计工作？基于上述两个案例，通过开发基于 Revit 的智能优化设计插件以探索 Revit+Dynamo 与 Python 协同的深化设计方法。

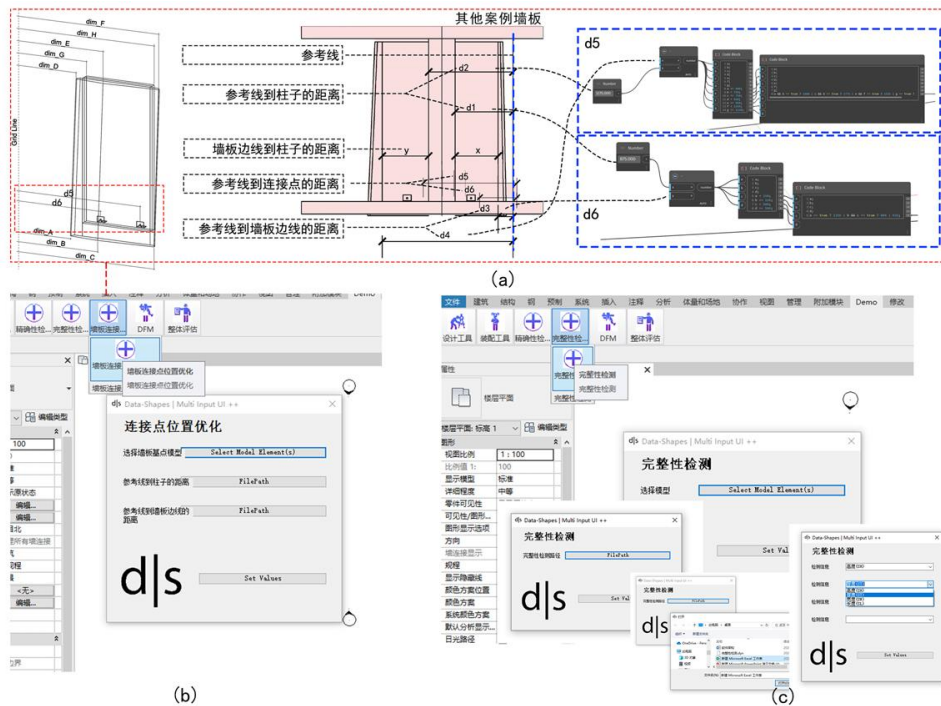


图 10 (a) 墙板案例转化；(b) Orchard Commons 案例插件应用；(c) Brock Commons 案例插件应用 (图片来源：作者自绘)

具体为借助外部插件 Dyno Browser，将设计逻辑对应的电池组文件放入插件相应的根文件夹内，通过设置相应输入按钮，即可通过设定的运算逻辑进行智能判定和修改。在 Orchard Commons 学生公寓中，通过“ $x=875-dim_G$ ， $y=dim_H-1275$ ”计算逻辑解决墙板与主体位置连接点位置错位的问题。如图 10 (a) 所示，这一逻辑也适用于其他墙板案例。如图 10 (b) 所示，用户只需在插件中输入参考线到柱子的距离 (d1、d2) 和参考线到墙板边线的距离 (d3、d4) 作为固定参数，插件将输出墙板边线到柱子的距离 x 、 y 作为约束条件。根据 x 和 y 的区间确定优化后的连接点位置，并将优化后的参数 d5、d6 导出为 Excel 表格，自动调整模型中的墙板位置。针对真实建造案例 Brock Commons 学生公寓中设计成果信息不足等深化设计错误问题，基于对案例的分析，同样这一逻辑也适用于检测其他案例模型参数，如图 10 (c) 所示，在插件中用户能够根据需求检测其 BIM 模型的完整性和精确性，将需要检测的 BIM 墙板构件模型作为插件的输入数据，根据自己所需要的真实建造数据比如“长度(SL)”“宽度(SW)”“高度(SH)”“厚度(ST)”等具体设计约束条件增加需要检测的参数，选择完成后插件会自动的检测参数，并将结果输出为 Excel 表格格式，方便建筑师对模型信息的完整性和精确性进行分析。

3.2 BIM 参数化智能优化设计插件工具展望

当前设计插件虽然能够解决真实建造案例 Orchard Commons 和 Brock Commons 项目，在深化设计阶段存在的盲区或错误 (如连接点位置错误、BIM 模型信息不足或信息错误) 导致的具体问题，但类似问题在实际建造过程中仍然存在，并不具有普遍性。通过对案例问题进行分析，发现基于 OC 和 BC 案例的优化过程与 DFMA 理念 (面向制造与装配的设计) 所倡导的减少构件数量、模块化和标准化设计、防错设计等理念要点相契合，因此为了更系统地应对这些问题，研究希望引入 DFMA 理念，并将其与 BIM 参数化智能插件相结合 (图 11)，在插件开发中增加更多优化设计的模块。

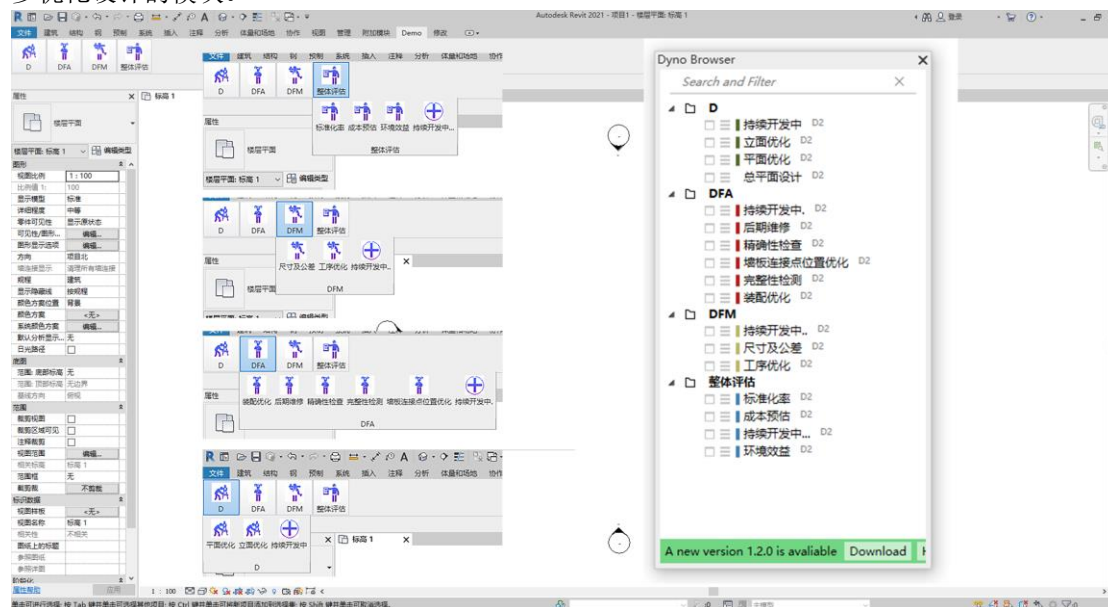


图 11 BIM 参数化智能设计插件工具 Demo 版 (图片来源: 作者自绘)

具体来说，插件将包括以下几个模块：1. 方案设计模块，整合现有的建筑设计算法 (如平面、立面设计算法)，帮助建筑师快速上手并提高设计效率。2. 在设计与装配模块中，基于 DFMA 理念，简化产品设计、减少零件数量，并实现建筑构件的标准化与模块化设计，以便于装配和后期维护。3. 在设计与制造模块，通过控制零件材料成本、减少零件种类和数量，以及优化模具使用，

提升构件标准化,降低材料浪费和成本。4.在整体评估模块,对设计方案进行可制造性和可装配性评估,确保设计阶段全面考虑制造与装配需求,减少后期返工,保证项目顺利进行。

4. 结语

智能建造和人工智能的飞速发展使得以真实数据驱动装配式建筑设计成为可能,而装配式建筑构件的深化设计需要遵循建筑标准化和“少规格,多组合”的基本原则,存在大量的重复性工作,BIM参数化智能设计工具可替代建筑师准确和高效地完成部分判定和修改的重复性工作。本文以加拿大不列颠哥伦比亚大学 Orchard Commons 和 Brock Commons 学生公寓的墙板构件为例,结合 Revit, Dynamo 和 Python 的 BIM 参数化智能工具协同应用,分别分析和探索了应用真实建造数据驱动的墙板连接点位置和 BIM 模型的智能优化设计过程,提出基于 Revit 的智能优化设计插件和与 DFMA 理念融合的装配式建筑构件深化设计插件工具设想,力求探索优化设计建模与真实建造约束之间的交互机制,为建筑师提供更加系统、准确和高效的解决方案,但由于装配式从设计到建造的复杂性较高,在未来的实践中仍需进一步检验和完善。可以预见,随着数字化技术的“人工智能”扎根建筑学学科的程度不断增强,将形成学科本体与新兴技术相互交织的丰富内涵,为智能时代探索建筑师融合智能工具的装配式建筑设计提供计算性设计新范式的借鉴和启示。

参考文献

- [1] 中国建设报.智能建造推动建筑产业变革[J].低温建筑技术,2019,41(06):83.
- [2] 丁烈云. 数字建造导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [3] 汪丛军,叶娟娟,邹胜,等.基于数据驱动的智能建造工业互联网体系及应用[J].中外建筑,2023,(12):35-39.DOI:10.19940/j.cnki.1008-0422.2023.12.006.
- [4] 本刊编辑部.徐卫国:数字建筑,从虚拟到现实[J].住宅与房地产,2020,(14):10-17.
- [5] 尚春静,姚凯卿,李小冬,等.基于区块链的装配式建筑建造质量智能管理平台研究[J].建筑经济, 2022, 43 (5): 76-83.
- [6] 刘念雄,张竞予,王珊珊,等.目标和效果导向的绿色住宅数据设计方法[J].建筑学报,2019,(10):103-109.
- [7] 李丽红,贾茂权.智能建造背景下装配式建筑质量管理影响因素研究[J/OL].工程管理学报,1-6[2024-08-24].<https://doi.org/10.13991/j.cnki.jem.2024.04.001>.
- [8] Shahrokhi, H. (2016). Understanding how advanced parametric design can improve the constructability of building designs (T). University of British Columbia. Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0308669>

注释

- 1) 本文得到国家自然科学基金青年科学基金项目(52008203)、国家留学基金管理委员会公派博士后项目(202108320176)、江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX24_1597)的资助。
- 2) 加拿大不列颠哥伦比亚大学(UBC, University of British Columbia, Canada)应用科学学院土木工程系 Sheryl Staub-French 院士的 BIM TOPiCS LAB 研究团队及其成员 Hooman Shahrokhi, UBC Sustainability Hub 对 Orchard Commons 和 Brock Commons 学生公寓的案例研究工作提供了支持和帮助。