

基于 SketchUp 的传统村落活态化保护营建工序优化设计研究

刘思洁¹, 王海宁², 周欣³, 赵云涛⁴, 王伟⁵

摘要: 本研究针对传统村落活态化保护中的民居改造信息化工序模拟与现场建造辅助需求, 探索传统民居建筑营建设计一体化与工序信息化的实践路径。以宜兴市周铁村某民居更新为例, 基于 Ruby 语言开发工序模拟插件, 为模型中的构件赋予工序属性信息, 并通过解析工序编码进行真实建造的工序工艺推演, 以实现在建筑方案设计阶段基于 SketchUp 平台开展的工序优化设计。研发的工序信息模型建立了设计阶段和建造阶段的信息联动机制, 并在进一步拓展后与增强现实技术结合, 通过在地可视化指导施工, 促进设计方与施工方的有效沟通。

关键词: 传统村落; 活态化保护; 建造工序模拟; 建筑信息模型; 方案设计优化

Keywords: Traditional Village; Living Protection; Construction Process Simulation; Building Information Modelling; Optimization of Scheme Design

资助项目情况: “十三五”国家重点研发计划课题(2019YFD1100904): 传统村落活态化保护利用的关键技术集成示范; 东南大学“人工智能+教学”试点课程研究项目(202402): 城市与建筑数据挖掘与算法分析

引言

传统村落的活态化保护旨在提供可供常态化使用的空间, 需要在保持传统风貌的同时, 实现建筑空间形态与功能的提升。不同于直接拆除重建, 传统民居改造过程中的作业面较为局限, 既有建筑结构复杂, 因此相比凝冻式保护, 活态化保护对设计阶段提出了更高的要求。

1 研究背景

随着乡村振兴的推进, 传统村落的保护模式已从静态片面的“凝冻式”保护, 向“活态化”保护转变[1]。传统村落的生命力与价值在于生产生活职能的提供, 而非仅作为凝冻固化的文化遗产留存[2-3]。传统民居作为村落的基本空间单元和居民行为活动的载体, 是传统村落活态化保护利用的重点对象[4]。

近年来, 传统村落规划建设持续推进, 但仍有量大面广的传统民居建筑亟待风貌改善与空间功能提升[5]。传统民居活态化保护具有以下特点: 首先, 由于建造年代和地理文化的差异, 各地民居呈现独特的地域风貌与多样的结构特征, 需针对性地保护其传统风貌; 其次, 民居与生产生活紧密相关, 使用功能多样[6], 需根据居住者的需求切实关注建筑空间品质的提升; 再次, 活态化

¹ 刘思洁, 东南大学建筑学院, 在读硕士研究生

² 王海宁, 东南大学建筑学院, 助理研究员

³ 周欣(✉), 东南大学建筑学院, 副教授, 通讯作者邮箱: zhou-x06@seu.edu.cn

⁴ 赵云涛, 东南大学建筑学院, 在读本科生

⁵ 王伟, 东南大学建筑学院, 副教授

保护偏向局部修缮和功能扩展,改造时需细致考虑现有结构的影响;最后,我国乡村建造目前仍以传统工艺为主[7],施工主体多为未经专业识图训练的本地工匠,难以通过图纸传达设计与施工信息[7]。

因此,传统民居改造亟需精细化的设计建造工具,结合信息化技术进行工序模拟与施工辅助,通过建筑师的“技术介入”实现更适宜的活态化改造目标。

2 技术现状

2.1 WBS 编码与施工工序研究

工作分解结构(Work Breakdown Structure, WBS)是一种项目管理方法,通过将项目分解为具体活动,形成便于管理的工作包。在建筑领域,WBS已被广泛应用于施工管理的工序编码。文江涛等[8]基于BIM(Building Information Modelling)模型分割WBS编码规则,提出了一种基于数字孪生的施工质量信息管理方法。张建平和王洪钧[9]研发建筑施工4D模型,对施工对象进行工程结构分解并赋予WBS编码,通过三维模型对象与WBS工序节点的连接,实现施工进度计划的调整和控制。龙晴等[10]在装配式住宅的施工阶段应用WBS技术进行施工组织设计。

2.2 基于BIM的施工工序模拟

BIM施工模拟是一种基于建筑信息模型的虚拟工程实施技术,通过附加建造过程和施工工序等信息,进行施工过程的可视化模拟,从而提升施工质量并降低施工风险[11]。一般情况下,设计类BIM软件(如Revit)用于建模,随后将模型导入具有工序模拟功能的分析类BIM软件(如Navisworks、MS Project、Synchro等)进行施工工序模拟[12]。这些工序模拟软件会应用WBS组织和标识项目的各个部分,确保每个构件的施工过程可以单独跟踪和管理。上述工序模拟软件多应用于大型工程项目的施工管理阶段,且设计建模和施工模拟在不同的软件平台进行,操作相对复杂、信息输入工作量较大。

2.3 传统民居活态化保护的工序设计

传统民居活态化改造在工序设计方面与普通新建项目有显著不同。在一般的新建或拆除重建项目中,每步工序仅涉及新构件的安装,工序与构件之间呈单一映射关系。然而,在传统民居更新改造中,根据方案设计和建造需求,需考虑原有构件的保留、拆除、甚至反复拆装等多种工序,构件与WBS工序编码的映射关系更为复杂,并非一一对应。因此,基于活态化保护的传统民居改造通常具有项目规模小、工序复杂的特征。此外,不同于由专业团队技术人员承担的大型施工项目,传统民居的改造任务多由当地工匠承担,他们在实际操作过程中往往难以应用BIM软件进行设计交流。在有限的技术条件下,如何将WBS工序编码与改造过程中的各类构件关联,实现信息化工序模拟和辅助建造,成为研究需要解决的主要问题。

3 SketchUp 工序模拟插件开发思路

SketchUp是一款主流三维建模软件,界面简洁、交互友好,广泛应用于建筑设计阶段,并内置完善的Ruby API接口,支持构件信息提取和模型视图调整等功能扩展[13]。因此,本研究选择对SketchUp进行二次开发,通过为仅包含几何信息的模型构件附加工序信息,建立工序信息模型,以实现工序模拟的可视化,辅助设计与建造过程。

工序模拟插件的核心功能实现思路如下(图1):①通过WBS编码生成工序清单,并设定命名规则,将每个构件与相应工序编码关联。②检索模型构件,解析其命名属性中的工序编码,获取构

件的工序信息。③结合工序指针标定的工序状态进行综合分析，判断并设定构件的显示属性，实现工序模拟可视化。

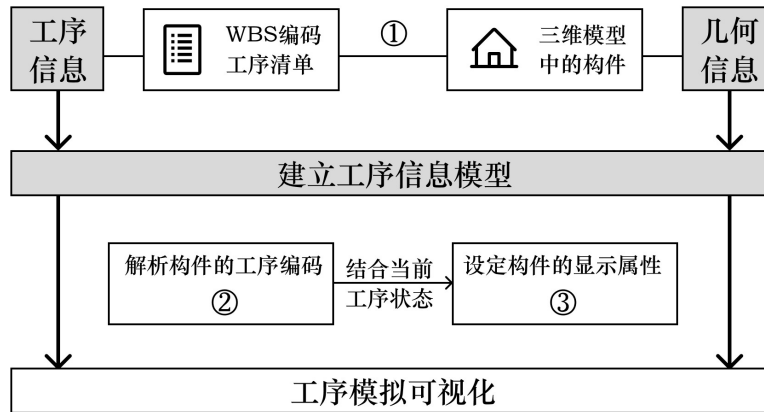


图1 工序模拟插件开发思路（图片来源：作者自绘）

3.1 WBS 工序编码与构件的命名规则

首先，从改造的前期方案设计阶段就开始工序设计，并对施工工序进行工作结构分解，按照分层编码的方式，赋予一级、二级和三级工序相应的数字编号，如 1, 1.1, 1.1.1，按施工流程生成 WBS 编码的工序清单。

其次，依据 WBS 编码的工序清单，按照命名规则为模型中每个构件赋予唯一名称，具体数据类型为列表，以此将工序信息附加给每个构件。构件的命名规则如下：①若构件只涉及单一工序，则命名为其对应工序的 WBS 编码，即具有单个元素的列表。②若构件涉及多步工序，则命名为其对应的所有工序的 WBS 编码集合，即具有多个元素的列表。该列表中，奇数位的 WBS 编码表示构件在该工序中被安装，而偶数位的 WBS 编码表示构件在该工序中被拆除。

以上步骤形成两个集合：WBS 工序编码集合和构件集合。构件集合中每个构件的命名由 WBS 工序编码生成，隐含其工序信息。由于构件可能涉及拆除、安装和反复拆装等多种操作，单一构件可能关联多步 WBS 工序编码；相应地，某一步工序的 WBS 编码可能出现在多个构件的命名中。因此，这两个集合的映射关系并非一一对应，解析时需重点处理。

3.2 构件的检索与工序编码解析

建模时，三维模型中的构件全部以 SketchUp 的组件（Component）形式建立，构件的单一命名则通过组件图元信息中的参数属性手动赋予。由此可实现 SketchUp 模型中的构件检索及其对应的工序信息解析，具体方法如下：首先对模型文件中所有元素进行遍历，通过 `.typename == "ComponentInstance"` 语法筛选出模型中的所有组件（component）类型，再调用 `.definition.name` 方法，获得每个构件的命名属性，接下来通过字符串分割等方法，对该构件命名属性中的 WBS 编码进行解析，可以判断出该构件涉及哪一步或者哪几步工序，以及在每步工序是拆除还是安装。

3.3 结合工序状态设置构件显示属性

在检索构件并解析其工序信息后，需要结合动态工序指针，即全局变量 \$p，分析该构件在当前工序状态下的显示情况。指针指向工序清单集合，其数值表示当前工序在集合中的位置序号，小于指针值的为之前的工序，大于指针值的为之后的工序。构件的显示状态通过修改其 `“.hidden”` 属性来设置，这是面向对象编程中常用的方法。

当构件仅涉及一步工序时，该工序必定是安装，只需将其与工序指针 $\$p$ 进行比较，判断是否显示；而当构件涉及多步工序时，不仅需分析在每一步工序上是拆除还是安装，还需综合考虑这些工序与工序指针 $\$p$ 之间的位置关系，以最终确定构件的显示状态。

4 软件功能模块设计与程序界面

该工序优化软件以插件形式运行于 SketchUp 建模软件上，用户界面使用 SketchUp Ruby API 的 UI 模块创建，通过 `UI::Toolbar` 创建工具栏，并使用 `UI::Command` 为工具栏的按钮定义动作，每个按钮点击时都关联并调用一个指定的函数。整个工序模拟插件设置了九个插件交互按钮(图 2)，分为三个功能模块：

(1) 初始设置模块

- Function01: 输出所有工序构件
- Function02: 输出所有工序序列

(2) 构件查看模块

- Function03: 显示特定工序构件
- Function04: 显示所有工序构件

(3) 工序推演模块

- Function05: 从零开始
- Function06: 从特定工序开始
- Function07: 上步工序
- Function08: 下步工序
- Function09: 切换显示

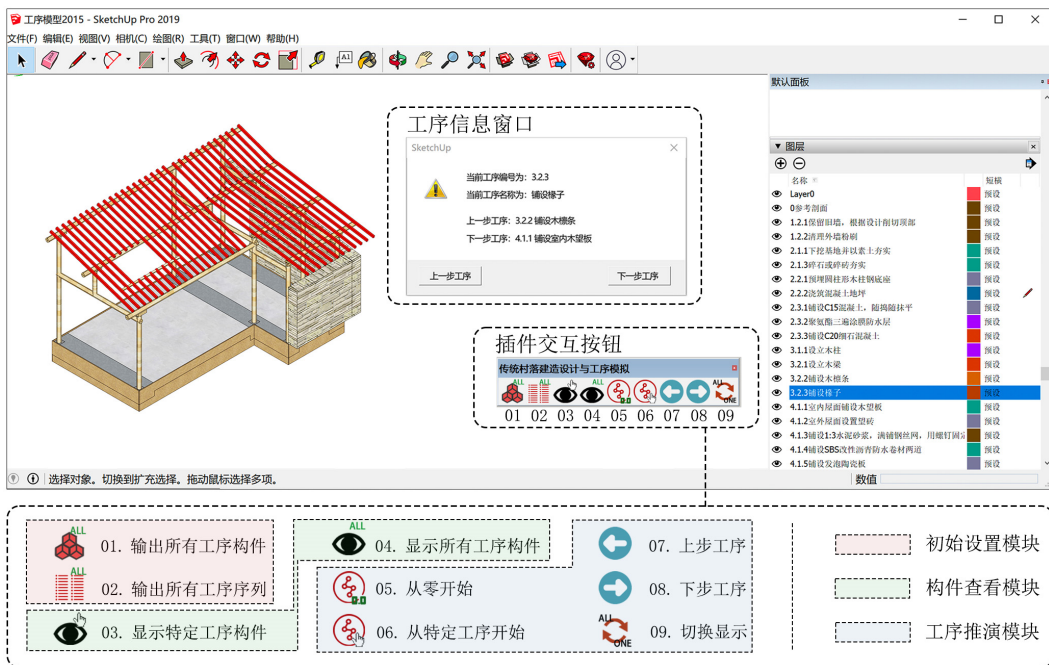


图 2 SU 工序模拟插件界面与交互按钮 (图片来源: 作者自绘)

4.1 初始设置模块

输出所有工序构件 (Function01)，对应 3.1 中的构件集合。系统遍历当前模型文件中的所有构件，识别每个构件的唯一编码名称，并装载到构件集合的全局变量列表。

输出所有工序序列 (Function02)，对应 3.1 中的 WBS 工序编码集合，本例涉及的 WBS 工序编码首字符范围为 0 到 9。系统遍历当前模型文件中的所有构件，识别每个构件的唯一编码名称，将其还原解析为 WBS 工序集合的信息，去除重复并排序，然后装载到工序集合的全局变量列表 (图 3(b))。

这两个按钮功能会通过控制台输出相关信息，并弹出对话框展示输出结果 (图 3(a))，返回结果可用于对构件和工序信息进行检查。另外，构件集合与 WBS 工序编码集合被装载到相应的列表中，完成了两个全局变量的初始设置，是其他功能函数运行的前提。

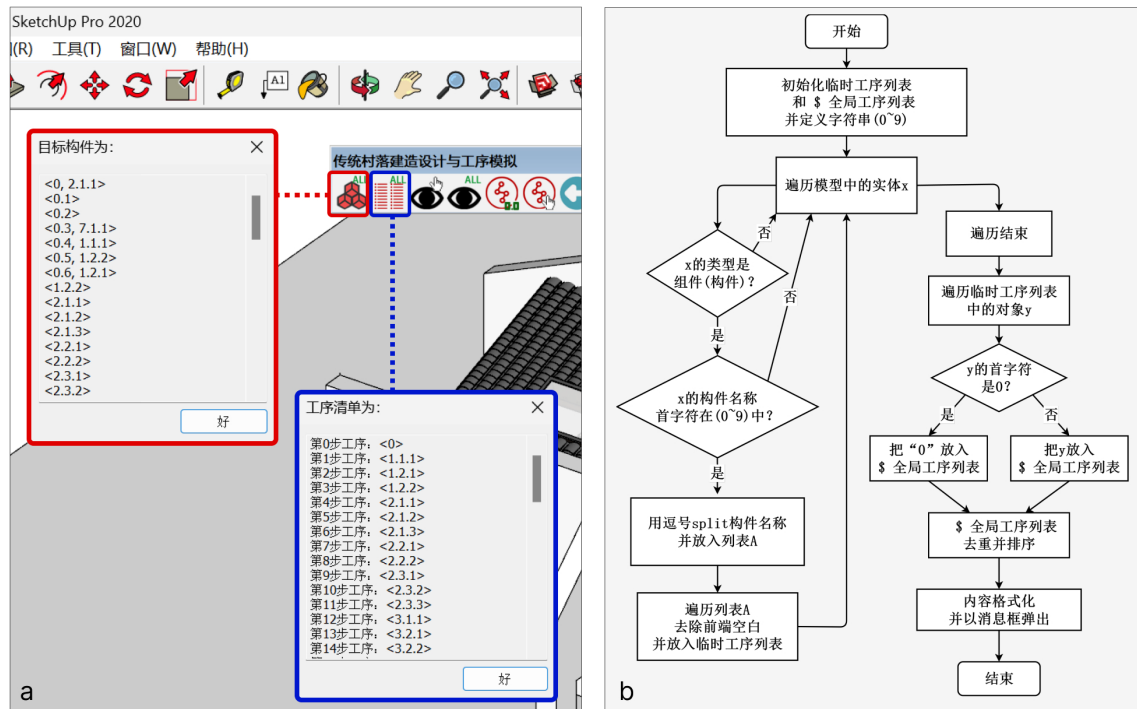


图 3 初始设置模块 (图片来源: 作者自绘)

(a. 构件集合与工序序列的输出结果 b. Function02 的代码流程图)

4.2 构件查看模块

显示特定工序构件 (Function03)，系统首先遍历当前模型文件中的所有构件，识别每个构件的唯一编码名称，并装载到构件集合的全局变量列表。然后创建对话框，以构件集合中所有以 WBS 工序编码命名的构件作为下拉菜单的选项 (图 4(a))，并接受用户选择。根据用户的选择，再次遍历并隐藏模型中的全部构件，仅将用户所选择的特定工序的构件进行消隐，调整和缩放视图使其居中显示。

显示所有工序的构件 (Function04)，系统遍历模型文件中所有的构件，并将其 ".hidden" 属性设置为 false，此时三维模型中各步工序涉及的全部构件都恢复到默认显示的初始状态，建筑改造前和改造后的模型会在视窗中叠合显示。

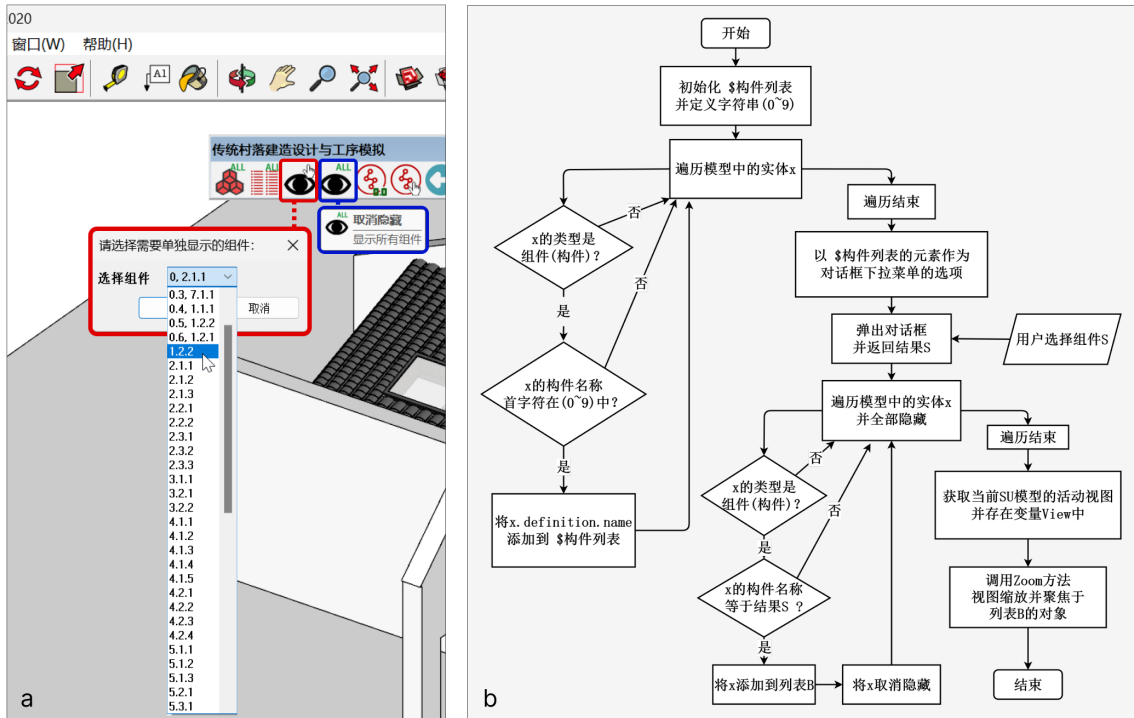


图4 构件查看模块（图片来源：作者自绘）

(a. 通过下拉菜单选择显示特定工序的构件 b. Function03 的代码流程图)

4.3 工序推演模块

该模块包含插件与工序模拟相关的五个功能：从零开始（Function05）、从特定工序开始（Function06）、上步工序（Function07）、下步工序（Function08）和切换显示（Function09）。工序推演的起点可以从零开始或从特定工序开始，通过下拉菜单选择跳转的工序后，会有消息弹窗提示该步工序的名称与工艺做法（图5(a)）；上步、下步工序能够在模型中逐步显示每一步构件的拆除和安装情况；切换显示功能可以在只显示当前工序构件和显示当前及之前工序构件的模式间进行切换，便于聚焦当前工序包含的构件或整体查看当前工序构件与其他构件的关系。

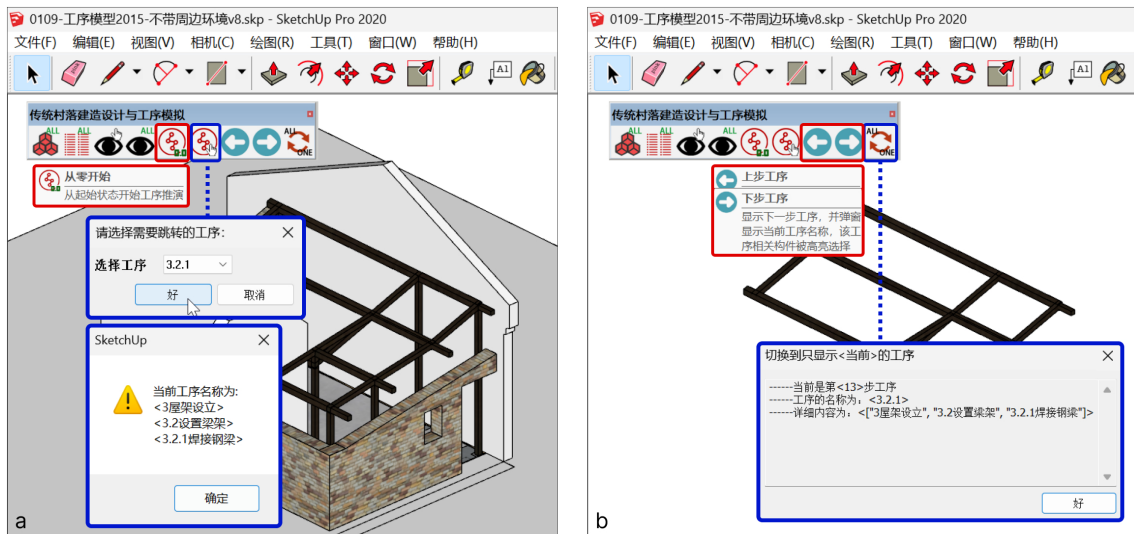


图5 工序推演模块的部分程序界面（图片来源：作者自绘）

(a. 显示当前及之前工序构件 b. 仅显示当前工序构件)

该部分函数涉及比较复杂的构件工序状态判定与显示属性设置（图6），除了3.3中的工序指针 $\$p$ ，还定义了全局变量 $\$acc = [[], []]$ 这一嵌套列表（列表中包含两个列表元素），用以存放不同工序状态下的构件，第一个列表作为当前工序构件组，第二个列表作为之前工序构件组。将构件分为之前工序和当前工序两大组之后，还要结合目前设定的总体显示状态，通过调用Function09 具体分析不同工序状态下的每个构件的显示情况。

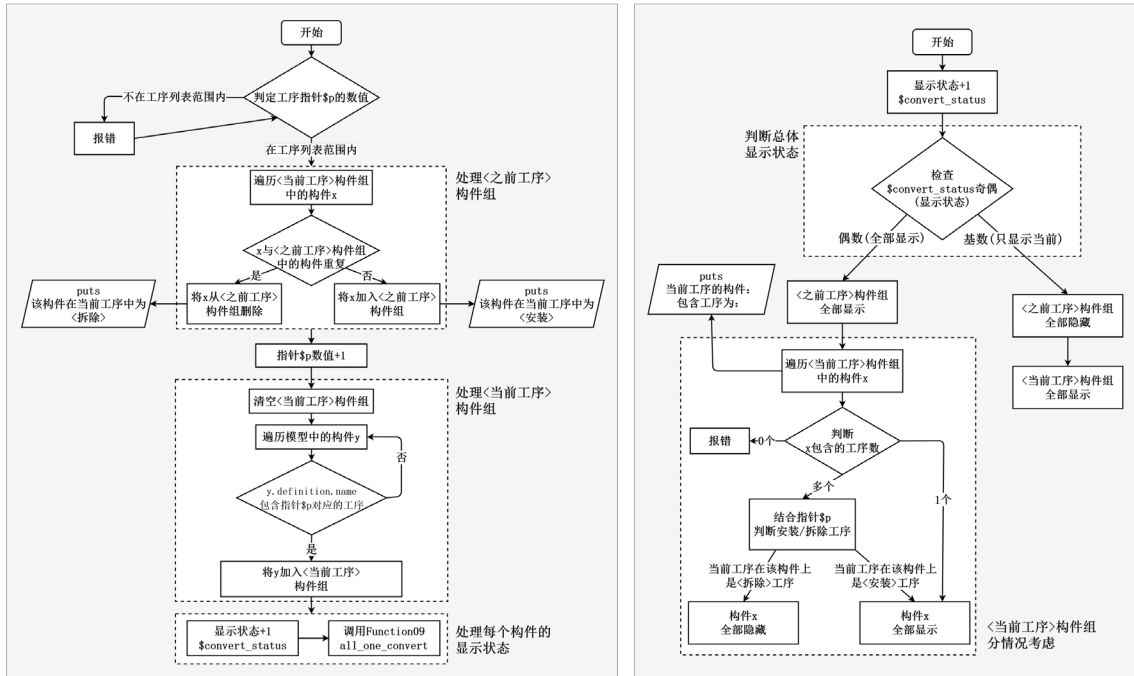


图6 Function08 和 Function09 的代码流程图（图片来源：作者自绘）

5 工序信息模型与 AR 技术结合的拓展应用

通过 SketchUp 工序模拟插件的开发，将模型构件与工序信息相关联，形成了工序信息模型。该工序信息模型进一步扩展，与增强现实技术（AR）结合，可以服务于传统村落活态化保护营建的各个阶段。

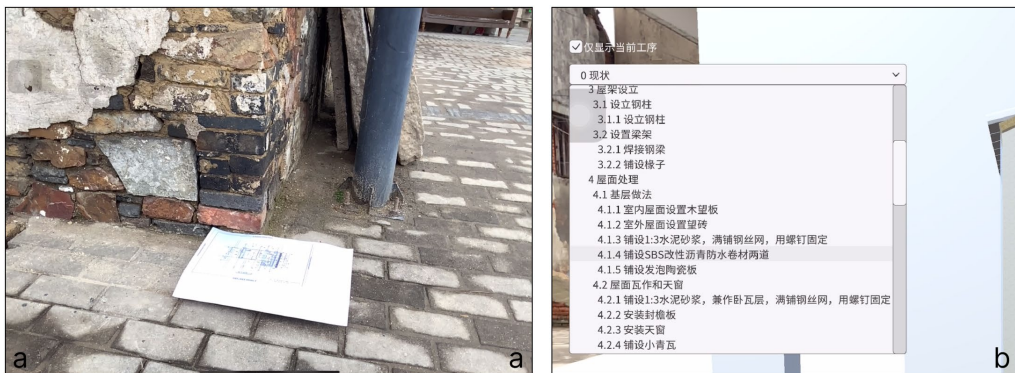


图7 工序信息模型结合增强现实技术的扩展应用（图片来源：作者自绘）

(a. 摄像头识别图纸确定工序模型锚定点和比例 b. 下拉菜单选择特定工序)

目前 AR 辅助建造软件已在 iOS 系统上进行开发使用，应用时首先通过 iPad 摄像头识别图纸（图7(a)），确定工序模型的锚定点和比例，将模型加载到场地中。通过下拉菜单可以跳转查看特定的工序，并勾选是否仅显示当前工序的构件（图7(b)）。通过图8(a)和图8(b)对比，红色虚

线是白色墙体与木墙交界的位置，可以看出加载到场地中的模型精度与实际建筑的精度误差仅在1-2厘米左右，工序模型能够比较精准地映射到现实场景中，具有较好的现场应用价值。

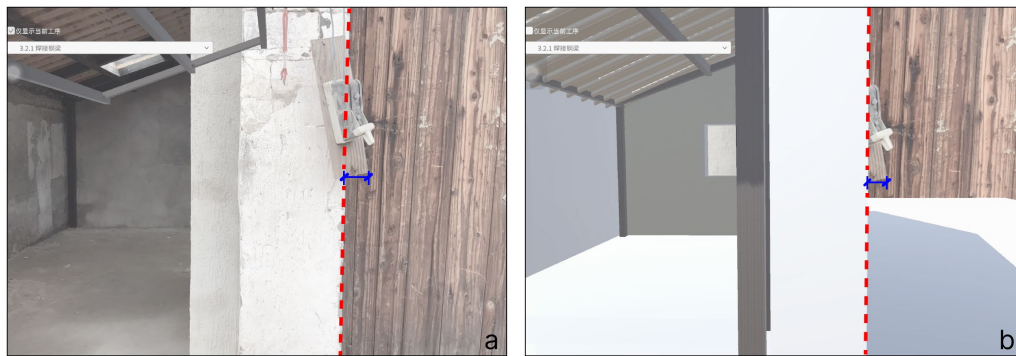


图8 模型加载到场地中（图片来源：作者自绘）

在营建开始前，将已有的传统民居建筑作为参照对象，将工序信息模型以AR技术展现在真实的乡村环境中，能够提前验证活态化保护利用设计的正确性与合理性，在提供设计反馈的同时，实现可视化的施工图交底。

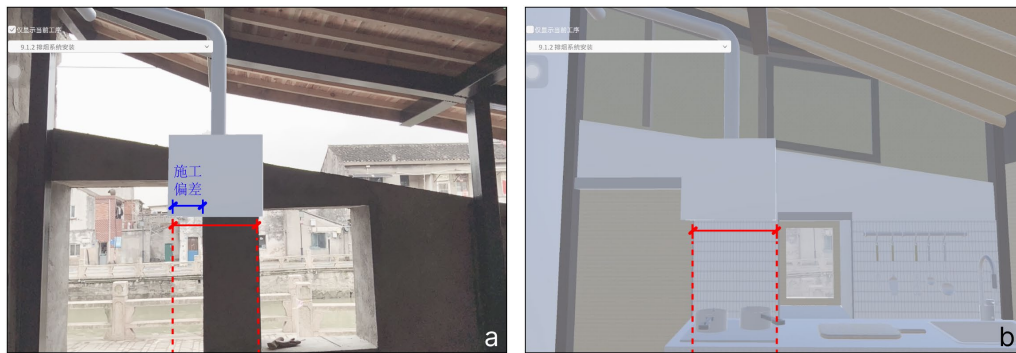


图9 通过模型检测施工偏差（图片来源：作者自绘）

在营建进行中，采用AR技术进行营建辅助并指导施工，方便营建参与人员更好地理解工序流程，也能快速发现实际建造与设计模型的偏差，进行及时调整。比如通过图9(a)和(b)的对比，可以发现实际建造时，两个洞口间的墙体偏窄，出现了较大的施工偏差，这是左侧门洞开得过大造成的。

在营建完成后，通过模型可以直观地进行质量检验与验收，模型隐含的工序信息也为日后运营与维修提供了数据支撑。

结语

研究从传统村落活态化保护的现实需求出发，基于Ruby语言开发工序模拟插件，建立工序信息模型，使SketchUp具备了BIM类建模软件的施工组织模拟功能。同时，研发的工序信息模型还可在后期施工阶段进行拓展，结合增强现实技术在地可视化指导施工。这为传统民居改造提供了营建设计一体化的新方法，并配套研发了工具插件，提高了建筑师对活态化保护营建过程的把控能力。

然而，本研究仍存在一些不足之处：插件开发的代码仅基于特定项目的工序编写，推广应用潜力有待考证；构件与工序编码的关联需要通过构件的属性命名，在建模时单独手动赋予，略显繁琐。在后续研究中将针对上述问题开展进一步的研究与优化。

参考文献

- [1] 吴锦绣, 徐小东, 张玫英, 等. 传统村落活态化保护利用的多元路径建构——以环太湖地区周铁传统村为例[J]. 南方建筑, 2022,(10):89-98.
- [2] 王建国. 历史文化街区适应性保护改造和活力再生路径探索——以宜兴丁蜀古南街为例[J]. 建筑学报, 2021,(05):1-7.
- [3] 鲍莉, 李海清, 刘畅, 等. 传统民居功能与性能整体提升路径实探——以江苏宜兴历史城镇民居更新为例[J]. 新建筑, 2017,(05):12-17.
- [4] 陈喆, 周涵滔. 基于自组织理论的传统村落更新与新民居建设研究[J]. 建筑学报, 2012,(04):109-114.
- [5] 吴正浩, 王海宁, 徐小东. 新型建筑工业化在传统民居建筑活态化保护利用中的应用——以宜兴周铁社区(村)为例[J]. 城市住宅, 2021,28(07):23-28.
- [6] 赵之枫, 王峥, 云燕. 基于乡村特点的传统村落发展与营建模式研究[J]. 西部人居环境学刊, 2016,31(02):11-14.
- [7] 徐小东, 吴奕帆, 沈宇驰, 等. 从传统建造到工业化制造——乡村振兴背景下的乡村建造工艺与技术路径[J]. 南方建筑, 2019,(02):110-115.
- [8] 文江涛, 陈佳麟, 詹健江, 等. 基于BIM的建筑施工质量信息表达与管理方法[J]. 土木工程与管理学报, 2024,41(02):72-77+97.
- [9] 张建平, 王洪钧. 建筑施工4D⁺模型与4D项目管理系统的研究[J]. 土木工程学报, 2003,(03):70-78.
- [10] 龙晴, 沈良峰, 张志东. 装配式住宅施工阶段WBS应用研究[J]. 施工技术, 2017,46(16):47-52.
- [11] 叶浩文, 周冲, 樊则森, 等. 装配式建筑一体化数字化建造的思考与应用[J]. 工程管理学报, 2017,31(05):85-89.
- [12] 王珺. BIM理念及BIM软件在建设中的应用研究[D]. 西南交通大学, 2011.
- [13] 张敏. 基于BIM的装配式建筑构件标准化定量方法与设计应用研究[D]. 东南大学, 2020.

图表来源:

图1-图9: 作者自绘