

复杂场地条件下装配式建筑 AI 辅助 BIM 协同设计应用研究——以淮南春申湖公园绿色建材融合研发中心为例

万芄希 褚作勇 (通讯作者)

安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽淮南, 232001;

摘要: 建筑信息模型 (BIM) 在装配式建筑设计与建造全过程中占据核心支撑地位, 但其应用于复杂地质场地、多维度性能约束及全流程质量管控场景时, 传统 BIM 技术在设计决策的科学性、场地适配的动态响应能力上仍存在明显短板。本文以淮南春申湖公园绿色建材融合研发中心项目为工程实践载体, 构建 AI 辅助 BIM 驱动的装配式建筑协同设计体系, 重点围绕塌陷区地质敏感场地适配、绿色建材性能提升、预制构件全生命周期质量管控及产教融合空间布局四大核心问题开展针对性研究, 深入剖析 AI 技术在提升设计决策效率、强化结构安全性能、优化建造协同水平中的应用原理与实践价值。研究表明, 该协同设计体系可有效提升复杂场地条件下装配式建筑的综合性能与智能化建造水平, 为同类装配式建筑协同设计提供切实可行的工程实践路径与技术参考。

关键词: BIM 技术; 装配式建筑; 人工智能; 数字孪生; 地质数字皮肤; 产教融合

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.011

引言

建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 技术为装配式项目提供了跨专业协同的平台, 能够把建筑、结构、机电与构件信息统一到同一模型中, 支持深化设计、构件拆分、进度与成本管理工作^[1]。然而, 在不少工程实践中, BIM 更多承担模型表达和碰撞检查的角色, 面对复杂场地条件时, 模型往往缺少对地质风险的可计算表征; 面对多目标性能约束时, 方案比选依赖人工经验与反复试算, 迭代效率不高; 面对构件从设计到生产、运输、安装再到运维的链条时, 数据在各环节间容易断裂, 导致交付质量难以用统一标准持续验证^{[2][3]}。

人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术在数据学习、预测分析与自动生成方面具有优势, 可用于把分散的勘察、监测和生产数据转化为可直接参与设计决策的输入^[4]。将 AI 与 BIM 结合, 并不是简单叠加算法, 而是把设计、建造与运维的关键问题转译为可被数据驱动的流程: 在场地层面形成风险分区与基础策略的映射, 在建筑层面形成目标函数与参数约束的可计算体系, 在构件层面形成编码与质量检测的闭环, 在运维层面形成监测数据与模型状态的联动更新^[5]。

基于此, 本文选择淮南春申湖公园绿色建材融合研发中心作为研究案例。项目既要应对塌陷区地质不确定性, 又要承担绿色建材研发、成果展示与教学实训的复

合任务, 具有典型性。本文围绕场地适应、性能优化、质量闭环与产教融合四个方面展开, 提出 AI 辅助 BIM 协同设计框架, 并进一步归纳两项机制型创新: 地质数字皮肤用于支撑长期适应性运维, 产教融通循环引擎用于把真实工程数据转化为可持续的教学与研发资源。

1 项目概况与技术路线

1.1 项目背景

项目位于图 1 所示淮南市谢家集区塌陷区改造工程范围内, 基地紧邻春申湖公园北侧既有建材厂区。煤矿开采造成的长期沉降使场地呈现承载力差异大、局部变形累积明显、地层结构不均一等特征, 常规以单一安全系数控制的基础设计方法难以充分反映风险的空间分布。

项目定位为绿色建材融合研发中心, 除科研与试验外, 还承担成果展示与教学实训功能。研发中心整体呈围合式院落布局, 体现了装配式建筑在研发、展示、教学复合功能下的组织潜力。外圈空间可容纳实验室、材料样板间与设备用房等相对封闭的研发单元, 内庭院则承担采光、通风与景观渗透的公共核心, 有利于形成连续的参观视线与可控的安全边界。围合式体量也便于在立面层面展示不同绿色建材体系 (如预制围护墙板、可更换遮阳构件、透光围护单元等) 的组合逻辑。



图 1 绿色建材融合研发中心设计鸟瞰图

1.2 关键问题

结合场地条件与功能定位，本案例设计需集中解决：

- (1) 复杂地质条件下基础与结构的适应性决策。
- (2) 复杂地质条件下基础与结构的适应性决策。
- (3) 预制构件全流程质量一致性。
- (4) 产教融合的空间组织与可视化表达。

1.3 技术路线

本研究采用以数据为起点、以模型为载体、以算法为驱动、以反馈为闭环的总体路线。以无人机点云与勘察资料构建场地 BIM 基础；以 AI 进行地质风险评估与生成式方案探索；以 Grasshopper 等参数化平台实现方案快速迭代；以 BIM+AI 构建设计、生产、运维闭环，并通过空间可视化实现教学与展示。在该路线中，BIM 负责承载与组织跨专业信息，AI 负责把历史与实时数据转化为可用于决策的预测结果或方案候选，参数化工具负责把决策结果快速转译为可编辑的几何与构件配置，从而提高迭代速度并降低跨专业沟通成本。

2 AI 辅助 BIM 协同设计方法

2.1 复杂地质条件下的适应性基础设计

针对塌陷区场地的不确定性，首先把传统文字化勘察成果转化为可计算的空间模型。如图 2 所示。项目通过航测点云重建地形表面，结合钻孔、层位、地下水信息建立地层分层模型，并在 BIM 中形成可查询的土层参数库。这样做的意义在于把风险评估从经验描述转化为空间变量，使后续基础布置与构造调整能够在同一坐标体系下进行。

在场地地质风险评估阶段，收集场地历史沉降观测数据、煤矿开采影响范围、土层厚度分布、地下水水位变化等工程数据，采用 AI 技术对数据进行深度挖掘，拟合场地沉降变形趋势，划分地质风险等级，形成风险分区图与风险概率可视化成果，并与 BIM 场地模型进

行关联对接。针对地质风险较高的区域，基础设计优先采用刚度大、承载能力强的桩基础型式，强化基础抗沉降、抗变形能力，严格控制基础差异沉降；针对地质风险较低的区域，在满足建筑地基基础设计规范要求的前提下，采用浅基础型式，合理降低工程造价与施工复杂度。

在基础方案比选优化阶段，利用参数化设计平台，建立基础布置的标准化设计模型，将桩位布置、承台尺寸、基础埋深、地基处理范围等设计参数，与场地地质风险分区进行联动关联。通过多轮设计迭代调整，最终形成浅基础与桩基础相结合的混合基础体系，实现基础型式与场地地质风险等级的精准匹配，同时将基础构造复杂度控制在现场施工可实现的范围内。该设计过程注重决策的可追溯性与可解释性，每一次基础设计参数的调整，均能对应明确的地质风险指标变化或设计约束条件优化，便于设计审查与后期优化完善。

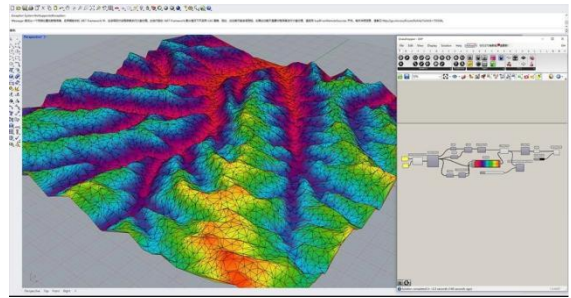


图 2 基于点云的场地地形重建与参数化地形生成流程

2.2 多目标生成式建筑设计与性能优化

研发中心的建筑形态不仅要满足功能组织，还需体现绿色建材示范属性。为避免仅凭经验在方案后期反复修改，项目在建筑设计阶段将关键性能指标前置并量化，形成多目标优化问题。常用的目标包括：日照与自然采光的有效利用、建筑能耗水平、结构效率与材料用量、空间适应性与可扩展性等。不同目标之间存在天然矛盾，例如增加开窗面积可能改善采光却提高冷负荷，增加结构冗余可能提升安全却增加材料消耗，因此需要在统一框架内进行权衡。

在实现路径上，参数化模型用于把建筑体量、开窗比例、遮阳构造、构件模数等变量显式化。AI 或优化算法在设定约束条件下生成候选方案集，并通过 BIM 平台或外部模拟工具对候选方案进行性能评估。性能评估结果回传后，可筛选出在多个目标上表现较均衡的方案，再针对关键敏感参数进行局部加密迭代。

对于装配式建筑体系而言，预制构件的模数标准化

与构造可装配性是设计过程中的核心约束条件。项目通过建立标准化预制构件族库，制定统一的构件模数规则，在保证建筑空间灵活性、功能适应性的前提下，严格控制非标构件的比例，降低构件生产、安装成本。建筑外遮阳系统、预制围护构件连接节点等细部构造，均采用参数化设计方式，实现构造设计细化与建筑性能优化的同步推进，避免出现建筑外观设计合理，但预制构件拆分困难、加工安装不可行的问题。

2.3 基于数字孪生的预制构件质量控制

装配式建筑的质量隐患，多产生于设计、生产、运输、安装各环节的信息衔接不畅，而非单一环节的施工质量问题。针对这一工程痛点，项目建立基于 BIM 模型的预制构件全生命周期质量管理体系，重点解决构件身份识别、质量信息全程记录、现场安装状态核验三大核心问题，实现构件质量的全程可追溯、可管控。

在设计阶段，采用 BIM 技术构建预制构件精细化三维模型，为每一类预制构件制定统一的编码规则，明确构件的材料规格、几何尺寸、连接方式、施工安装要求及质量验收标准等核心属性信息。该编码体系贯穿构件全生命周期，既满足施工图深化设计、构件加工生产的要求，也为后续生产计划编制、运输调度、现场安装、质量验收提供统一的数据依据，有效减少各参建单位之间的信息偏差，提升协同效率。

在生产阶段，采用二维码或射频识别技术，实现预制构件实体与 BIM 模型的精准关联，构件生产过程中的钢筋加工、混凝土浇筑、预埋件安装等关键工序，均进行详细的质量记录与数据留存。结合现场质量检测手段，对构件外观质量、几何尺寸偏差、预埋件位置精度等进行严格核查，将检测结果与 BIM 模型中的设计参数进行比对分析。若发现质量偏差超出规范允许范围，立即定位至具体构件及对应生产工序，及时采取返修措施或调整生产工艺，确保构件质量符合设计要求。同时，将构件生产质量信息、检测数据同步回写至 BIM 模型，使 BIM 模型能够实时反映构件的实际生产状态，形成“设计—生产”的数据闭环。

在施工安装及后期运维阶段，对关键预制构件、重要结构节点布置沉降、应力监测设备，实时采集构件运行过程中的应力应变、变形数据及周边环境条件信息，

将监测数据与构件编码进行关联，在 BIM 模型中实现构件运行状态的可视化呈现。当监测数据出现异常变化时，管理人员可通过 BIM 模型快速查询构件的生产厂家、安装时间、施工记录等相关信息，精准排查质量隐患，提升问题处置效率。通过上述全生命周期管理方式，使 BIM 模型不仅作为设计、展示、管理的工具，更成为支撑装配式建筑全生命周期质量管控的核心载体。

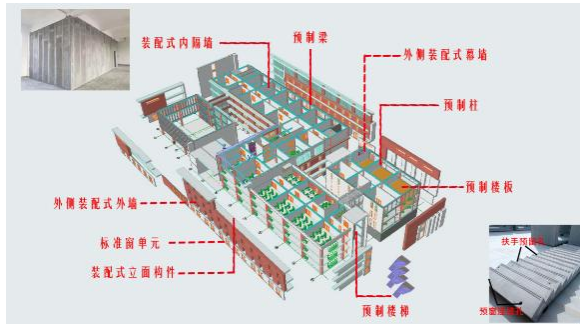


图3 装配式构件拆分与参数化构件族构建

2.4 面向产教融合的空间组织与信息集成

作为绿色建材融合研发中心，项目建筑空间设计需兼顾科研生产、成果展示、教学实训三大功能，实现三者的协同布局与互不干扰。如图4所示，项目在功能分区设计中，将研发试验区、成果展示区、教学实训区进行相对独立的空间划分，通过清晰的参观流线与实训流线，将三大功能区域有机串联，在严格划分安全管理边界、保障科研生产安全的前提下，为参观者、实训学生提供完整、连续的空间体验。

在成果展示与教学实训过程中，BIM 技术及相关数字化展示平台承担着工程信息整合、技术原理可视化的核心作用。项目在展示空间设置专业化导览系统与信息展示终端，将绿色建材性能参数、预制构件构造原理、装配式施工工艺等专业内容，通过 BIM 三维模型、施工过程影像、实物样板结合的方式进行直观呈现，帮助参观者、实训学生建立实体空间与建造技术逻辑的关联认知，清晰理解绿色建材的应用价值与装配式建筑的技术优势。在教学实训层面，将项目场地勘察数据、设计方案、构件生产记录、施工监测数据等真实工程资料，转化为教学案例与实训素材，引导学生结合 BIM 模型，深入学习复杂场地装配式建筑设计、施工、运维的全过程技术要点，帮助学生建立理论知识与工程实践的紧密联系，提升专业实践能力。

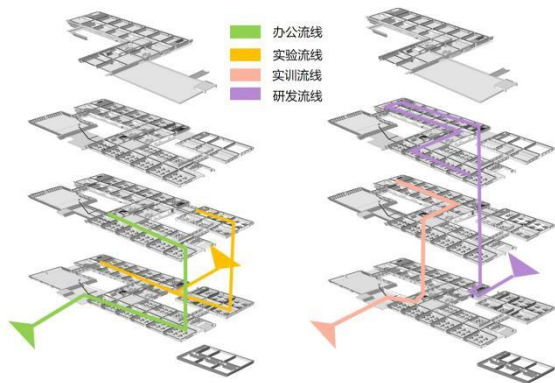


图4 研发中心空间流线与产教融合探索路径组织

3 关键创新点：基于数字孪生的产教融通循环范式

3.1 提出地质数字皮肤概念，实现受损土地的动态感知与调适

在复杂场地适应性基础设计的基础上，本文提出“地质数字皮肤”创新技术概念，通过在建筑基础、场地道路及重点绿化区域下方，布置沉降、应力、水分监测传感器，结合三维地质信息模型，构建场地地质条件长期动态监测系统，实时采集地层应力变化、地下水水位波动、场地沉降变形等相关数据。监测数据经AI技术分析处理后，用于修正场地沉降趋势预判结果，为基础结构的后期维护、加固调整提供精准的技术依据。

该技术实现了建筑与场地地质条件的动态联动，使建筑不再是孤立的静态结构，而是能够实时感知场地地质变化、主动适应场地风险的“智能载体”。当监测数据显示场地某一区域出现异常沉降、应力超标等风险隐患时，可及时通过调整基础维护策略、优化建筑使用荷载分布等措施进行干预，有效减缓地质风险对建筑结构的不利影响。该技术思路为煤矿塌陷区、工业遗留受损场地的再利用、生态修复及建筑设计提供了更加灵活、精准的技术路径。

3.2 构建产教融通的运行机制，实现教学与产业的协同发展

依托建筑空间载体与BIM+AI数字化平台的融合优势，项目构建了“研发—测试—展示—教学”四位一体的产教融通运行机制，实现绿色建材研发、工程实践与教学实训的深度协同。新型绿色建材、新型装配式构造形式可在建筑空间内进行实际应用测试，测试过程中的性能数据、应用效果同步用于成果展示与教学实训，为

学生提供真实的工程实践案例；同时，构件运维、场地监测过程中积累的工程数据，可反哺绿色建材研发工作，为技术优化、方案改进提供实践支撑。

在该运行机制下，教学、科研、工程实践三者形成良性互动循环，使产教融合不再局限于空间共用、资源共享的浅层层面，而是深入到知识积累、技术转化、人才培养的核心层面，实现工程实践成果向教学资源、研发成果的高效转化，为装配式建筑领域产教融合模式创新提供了可推广的实践范式。

4 优势与挑战

本案例在煤矿塌陷区复杂地质约束与绿色建材研发中心复合功能叠加的情境下，体现了AI辅助BIM在装配式建筑协同设计中的综合优势。通过无人机点云与BIM构建高精度场地模型，引入AI生成稳定性风险概率图并联动参数化平台完成混合基础体系优化，使基础选型与构造参数能够在安全性与经济性之间形成可解释、可追溯的决策路径；在建筑性能层面，生成式设计将采光、能耗、结构效率与材料利用率等目标显式化为可计算约束，使建筑形态与构件构造由经验驱动转向数据驱动，并通过参数化外遮阳与构件拓扑优化强化绿色建材示范属性；在建造与运维层面，基于BIM+AI的数字孪生闭环将质量控制前移至生产过程，通过视觉质检与传感回传实现设计、制造和运维的一致性交付，为研发与教学提供持续积累的真实数据。由此，建筑不再仅是功能容器，而是具备长期验证能力的运行型实验装置，使塌陷区这一传统意义上的高风险场地转化为智慧建造技术的验证场与绿色更新的示范载体。

与此同时，该路径在工程推广中仍面临若干现实约束。AI算法、传感系统与BIM平台之间的协同可靠性决定了风险预测与运维决策的可信程度，系统复杂性上升也意味着更高的运维管理门槛；定制化预制构件、智能检测与孪生平台在提升全寿命期效益的同时抬升初期投入，若缺乏可量化的成本—收益评估体系，难以在实际投资决策中形成共识；此外，项目涉及建筑、结构、地质、软件与教育等多学科交叉，传统流程与协作机制难以充分适配，跨专业组织与数据标准仍是落地关键。

5 结束语

本文以淮南春申湖公园绿色建材融合研发中心为例，围绕复杂地质适应、绿色性能优化、预制闭环质量

与产教融合空间四类问题,提出并论证了AI辅助BIM在装配式建筑设计中的应用路径。研究认为,AI辅助BIM的关键在于以数据驱动增强设计决策的可解释性与可验证性,并通过数字孪生实现设计、生产和运维的一致性交付。进一步提出的地质数字皮肤与产教融通循环引擎机制,为塌陷区场地的长期适应与产教研价值闭环提供了可推广的思路。

未来研究可在三方面深化:一是与CIM平台融合,实现城市尺度数据与建筑尺度数字孪生联动;二是完善风险评估与生成式设计的算法可解释与标准化接口;三是建立面向运维与教育的持续迭代机制,推动装配式建筑迈向更高水平的智能建造与协同设计

参考文献

[1] 荣博文,王颖. 基于LSS-BIM5D的装配式建筑全生命周期分析与优化研究[J]. 建筑经济,2023,44(S2):348-353.

[2] 杨柳荣. 基于BIM技术的装配式建筑全过程造价控制研究[J]. 工程抗震与加固改造,2025,47(02):203.

[3] 朱玉琴,王笑宇. 基于BIM的装配式建筑物化阶段碳排放对比研究[J/OL]. 安全与环境学报,1-13.

[4] 张宏,伊若勒泰,白苏日吐,等. 曲面结构建筑BIM数据化设计建造教学——以Solar Ark 4.0为例[J]. 建筑学报,2024,(08):34-40.

[5] 张少杰,张忍,肖铁桥,等. 装配式园林建筑建设阶段碳排放量化计算研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2025,57(01):115-123.

作者简介:万芃希,女,安徽省芜湖市人,就读于安徽理工大学建筑学专业。

通信作者:褚作勇,安徽理工大学土木建筑学院副教授、硕士生导师,研究方向:住宅建筑规划与设计、绿色建筑。