

基于 BIM 技术的低碳模块化智慧建筑预制构件生产与装配效率优化

崔子昂 周霄 杨楠 杨彬

沈阳城市建设学院 辽宁 沈阳 110000

【摘要】：在低碳模块化智慧建筑发展背景下，预制构件的生产与装配效率是制约其产业化进程的关键环节。BIM 技术凭借参数化建模、协同管理与可视化模拟能力，可实现预制构件从设计到装配全流程的精细化管控。通过构建 BIM 模型与生产数据的关联机制，能优化构件生产排程与工艺参数，减少材料浪费与能耗；在装配阶段，借助 BIM 的虚拟预拼装与进度模拟功能，可提前规避构件拼接冲突，提升现场施工效率。此举为平衡低碳目标与建造效率、推动模块化建筑工业化升级提供技术路径。

【关键词】：BIM 技术；低碳模块化建筑；预制构件；生产效率；装配优化

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.018

引言

低碳模块化智慧建筑因节能高效成为建筑行业转型重要方向，而预制构件的生产精度与装配效率直接决定其产业化水平。传统生产与装配模式存在信息断层，易导致构件适配性差、施工返工等问题，制约效率提升。BIM 技术的数字化与协同性优势，为破解这一难题提供支撑。通过将 BIM 深度融入预制构件生产与装配全流程，可实现信息实时共享与精准管控，为提升效率、践行低碳理念注入动力。

1 低碳模块化智慧建筑预制构件生产与装配的效率瓶颈

1.1 生产阶段：参数传递失真与工艺协同不足

预制构件生产的效率瓶颈首先体现在设计参数向生产参数的转化断层。设计阶段的 BIM 模型虽包含构件几何尺寸、材料性能等基础信息，但未与工厂生产系统建立实时数据交互机制，导致生产参数需人工二次录入，易因信息传递误差引发构件尺寸偏差或预埋件位置错误，造成返工浪费。同时，模块化构件的低碳性能要求与生产工艺存在协同矛盾，例如为提升构件保温性能而采用的复合墙体结构，可能增加模具复杂度与浇筑难度，导致生产节拍延长；而预制构件的标准化生产与个性化低碳需求的适配缺乏动态调整工具，工厂需频繁更换模具以满足不同项目的模块参数要求，显著降低生产连续性。此外，生产过程的能耗管控与效率提升存在失衡，部分工厂为追求产量而忽视设备负载均衡，导致高能耗设备长时间满负荷运行，

既增加碳排放，又因设备过热停机影响生产进度，形成“效率与低碳”的双重损耗。低碳模块化智慧建筑的预制构件生产与装配环节，是连接设计理念与实体建筑的关键纽带，其效率直接影响项目整体推进节奏与低碳目标实现。当前，受技术协同不足、流程割裂及标准缺失等因素制约，该环节存在多重效率瓶颈，难以满足模块化建筑工业化、集约化发展需求。

1.2 供应链协同不畅：材料流转与生产计划脱节

预制构件生产依赖稳定的供应链支撑，而当前材料采购、库存管理与生产计划的协同存在显著滞后。材料供应商的供货周期与工厂生产排程缺乏动态联动，导致主材（如钢筋、预制混凝土）供应提前或滞后，提前到货占用仓储空间并增加保管成本，滞后到货则造成生产线停工待料。对于智慧化模块所需的嵌入式传感器、管线接口等辅材，因其规格多样且需与构件精准匹配，若供应商未能按生产进度分批供货，易出现错发、漏发问题，迫使生产线临时调整工序，打乱原有生产节奏。同时，材料质量检验与生产进度的衔接存在空档，部分关键材料的性能检测报告滞后于生产需求，工厂为赶工期可能违规使用未验材料，若后期检测发现质量不达标，将导致整批构件报废，造成效率与成本的双重损失。预制构件的现场装配环节面临“设计-生产-施工”信息传递断裂的困境。设计阶段的 BIM 模型未同步更新生产过程中产生的构件实际参数（如因工艺偏差导致的尺寸微调），施工团队依据原始设计模型进行吊装定位，易出现构件拼接间隙超标或连接节点不匹配问题，需现场切割、打磨等二次加工，严重影响装配效率。

模块化建筑的智慧系统集成进一步加剧了装配复杂度，预制构件中预埋的管线、传感器接口需与其他构件的对应系统精准对接，但因缺乏可视化的协同装配方案，各专业施工团队（如机电、智能化）按各自进度施工，易出现管线碰撞或接口错位，导致智慧系统调试阶段故障频发，延误整体工期。

1.3 标准体系缺失：性能与效率的平衡缺乏依据

预制构件生产与装配的效率瓶颈根源之一在于标准体系的不完善。当前，模块化构件的生产精度标准未与装配工艺要求形成联动，例如构件的尺寸公差范围仅考虑生产可行性，未结合现场装配的容错空间制定，导致部分看似合格的构件因累积误差无法顺利拼接。低碳性能指标的量化标准同样缺失，生产阶段的能耗限额、装配阶段的碳排放量计算缺乏统一规范，工厂与施工单位为满足模糊的“低碳要求”，可能过度投入资源（如采用高成本保温材料、增加临时节能措施），反而降低生产与装配的经济性效率。智慧化模块的接口标准不统一，不同厂商生产的传感器、控制系统与预制构件的适配性缺乏规范约束，装配过程中需额外定制转接部件，既增加成本，又延长安装调试时间，制约智慧系统与模块化建筑的深度融合。这些瓶颈相互交织，形成“生产效率低-装配返工多-低碳目标难实现”的恶性循环，亟需通过技术整合与流程重构打破，为低碳模块化智慧建筑的工业化发展扫清障碍。此外，现场吊装与临时支撑的协同缺乏精准规划，构件吊装顺序未结合场地条件与模块重量分布优化，可能出现机械闲置或吊装路径冲突，增加无效作业时间，同时临时支撑的设置若未考虑后续模块的装配空间，需反复拆装调整，进一步降低装配效率。

2 基于 BIM 的预制构件生产与装配效率优化框架构建

2.1 框架核心架构：多层次协同体系的有机融合

框架以“数据层—模型层—应用层”为基础架构，形成覆盖生产与装配全流程的协同网络。数据层承担信息整合功能，通过建立标准化数据接口，实现 BIM 模型的设计参数（如构件尺寸、材料属性、预埋件位置）与生产系统的工艺数据（如设备运行参数、生产进度、能耗指标）、装配系统的现场数据（如吊装轨迹、拼接精度、工序进度）实时互通。模型层聚焦 BIM 模型的动态迭代，构建包含设计模型、生产模型与装配模型的一体化数字孪生体，设计模型为生产提供基础参数，生产模型根据实际加工数据修正设计偏差并反馈至 BIM 平台，装配模型则整合生产模型与现场条件，形成预拼装仿真场景。应用层面向具体业务场景，开发生产排程优化、虚拟预拼装、进度模拟等功能模块，为工厂管理人员提供生产计划制定工具，为施工团队提供可视化装配指南，实现效率优化的精准落地。基于 BIM 的预制构件生产与装配效率优化框架，是针对低碳

模块化智慧建筑的工业化特性，整合 BIM 技术与全流程管理理念，构建的“数据驱动—协同联动—动态优化”体系。该框架通过打通设计、生产、装配各环节的信息壁垒，实现预制构件从参数定义到现场拼装的全周期精准管控，为平衡生产效率、装配质量与低碳目标提供系统性解决方案。

2.2 框架运行逻辑：全流程闭环协同的动态调控

框架运行遵循“参数传递—仿真优化—反馈修正”的闭环逻辑，确保生产与装配环节的高效协同。在生产阶段，BIM 模型的设计参数自动导入工厂 MES 系统，生成个性化生产工单，明确各构件的加工工艺、设备分配与工序优先级；同时，通过 BIM 可视化功能模拟构件生产流程，预判模具更换、材料流转等环节的效率瓶颈，提前调整生产计划。生产过程中，实时采集设备运行数据与构件质量检测结果，通过 BIM 模型与实际参数的比对分析，识别尺寸偏差、预埋件错位等问题并自动推送至设计团队，指导参数修正以减少后期返工。进入装配阶段，基于更新后的 BIM 模型开展虚拟预拼装，模拟不同构件的拼接过程，检测连接节点的适配性，生成最优吊装顺序与路径规划；现场装配时，通过移动端设备实时调取 BIM 模型的三维指导信息，施工人员可对照模型完成构件定位与连接，同时将现场实测数据（如拼接间隙、标高偏差）上传至 BIM 平台，形成装配质量数字档案，为后续工序提供参考。

2.3 框架技术支撑：多维度技术融合的协同保障

框架的落地依赖多项核心技术的协同支撑。参数化建模技术是基础，通过将构件的几何特征、材料性能、生产工艺要求转化为可计算参数，构建智能构件族库，实现设计参数的快速调整与批量生产，当构件尺寸或功能需求变化时，BIM 模型可自动更新相关参数并同步至生产系统。物联网技术承担数据采集功能，在生产设备与构件上部署传感器，实时捕捉加工精度、设备能耗、构件位置等动态信息，通过 5G 网络传输至 BIM 平台，为生产排程与质量管控提供数据支撑。虚拟仿真技术强化过程优化能力，利用 BIM 与 VR 技术构建生产车间与施工现场的虚拟环境，模拟不同生产计划下的设备负载均衡情况、不同装配方案下的工序衔接效率，为方案比选提供直观依据。人工智能算法提升决策科学性，通过分析历史生产与装配数据，构建效率预测模型，自动识别影响生产节拍的关键因素（如设备故障率、材料供应延误）、导致装配返工的主要原因（如构件尺寸偏差、工序衔接不畅），并生成针对性优化建议。该框架通过整合 BIM 技术与全流程管理理念，打破了预制构件生产与装配的信息孤岛，实现了设计参数、生产数据与装配信息的无缝流转，为低碳模块化智慧建筑预制构件的效率优化提供了兼具系统性与可操作性的技术路径，推动生产与装配环节从粗放式管理向精细化协同升级。

3 预制构件生产与装配效率优化的实施策略

3.1 生产流程的精益化重构

生产流程的精益化需以 BIM 模型为核心, 构建“参数驱动—柔性生产—动态调控”的高效体系。基于 BIM 的参数化构件族库, 实现设计参数向生产参数的直接转化, 自动生成包含材料用量、加工工序、设备参数的生产工单, 避免人工录入误差。推行柔性生产模式, 通过 BIM 与生产执行系统的联动, 根据构件类型与交付期限动态调整生产线布局, 例如将同类型模块构件的加工任务集中分配, 减少设备切换频率。建立工序标准化体系, 结合 BIM 可视化功能制定统一的构件加工流程, 明确钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑等环节的操作规范与质量标准, 确保不同班组生产的构件一致性。同时, 通过 BIM 模拟生产全流程, 识别材料搬运、工序等待等非增值环节, 优化物料配送路径与工序衔接节奏, 减少无效作业时间, 提升生产连续性。预制构件生产与装配效率的优化需依托 BIM 技术的协同优势, 从生产流程重构、装配工艺革新、协同机制完善及技术应用深化等维度形成系统性策略, 实现全流程效率提升与低碳目标的协同推进。

3.2 装配过程的协同化革新

装配过程的协同化需打破传统现场管理模式, 构建基于 BIM 的“虚拟预拼—精准定位—实时反馈”机制。在装配准备阶段, 利用 BIM 开展虚拟预拼装, 将生产完成的构件模型与现场基础模型整合, 模拟拼接过程并检测节点适配性, 提前发现构件尺寸偏差、预埋件错位等问题, 制定针对性调整方案。现场装配时, 采用 BIM 与物联网融合的定位技术, 通过构件上的二维码或 RFID 标签关联 BIM 模型信息, 施工人员借助移动终端调取构件的三维安装坐标与连接要求, 结合全站仪等设备实现精准定位。建立多专业协同平台, 将土建、机电、智能化等专业的装配需求整合至 BIM 模型, 例如在预制墙体吊装时同步明确管线接口的预留位置, 避免后期开凿返工。同时, 实时采集装配过程数据, 通过移动端将构件拼接精度、安装进度等信息上传至 BIM 平台, 形成数字化验收档案, 为后续工序交接与质量追溯提供依据。

3.3 全链条协同机制的完善

全链条协同机制需覆盖设计、生产、装配各环节, 建立基于 BIM 的信息共享与责任联动体系。设计阶段, 组织生产厂

家与施工单位参与方案评审, 通过 BIM 模型明确构件的生产工艺要求与装配接口标准, 例如在设计图纸中标注构件的吊装点位置与承载力参数, 确保生产与装配需求前置融入设计。生产与装配环节, 搭建云端协同平台, 实现 BIM 模型的实时更新与多方共享, 生产厂家可上传构件加工进度与质量检测报告, 施工单位可反馈现场装配需求与进度计划, 双方通过平台动态协调交付时间与批次, 避免构件积压或供应短缺。建立问题协同处置机制, 当装配过程中发现构件质量问题时, 通过 BIM 模型追溯生产环节的工艺参数与责任人, 组织设计、生产、施工三方共同分析原因并制定整改方案, 确保问题快速闭环。此外, 推行模块化集成装配模式, 将管线、设备等系统在工厂预制阶段与构件集成, 通过 BIM 模拟集成效果, 减少现场安装工序, 提升整体装配效率。

3.4 技术应用的深度化融合

技术应用的深度化需强化 BIM 与新兴技术的协同, 拓展效率优化的应用场景。推动 BIM 与数字孪生技术融合, 构建生产车间与施工现场的数字孪生体, 实时映射构件加工状态与装配进度, 通过数据分析预测设备故障与进度延误风险, 提前采取预防措施。引入自动化生产技术, 结合 BIM 的参数化控制实现构件加工的机器人作业, 例如利用 BIM 模型驱动焊接机器人按预设路径作业, 提升钢筋骨架加工精度与效率。在装配阶段, 探索 BIM 与装配式建筑专用机械的联动, 例如将 BIM 模型中的吊装路径导入起重机控制系统, 实现自动化吊装, 减少人工操作误差。同时, 利用 BIM 的数据分析功能, 积累生产与装配过程中的效率数据, 构建效率优化知识库, 总结不同类型构件的最佳生产参数与装配工艺, 形成可复用的经验模板, 持续提升效率优化水平。通过上述策略的实施, 可充分发挥 BIM 技术的赋能作用, 实现预制构件生产与装配效率的系统性提升, 同时保障低碳模块化智慧建筑的质量与低碳性能, 推动其工业化、集约化发展。

4 结语

基于 BIM 技术的预制构件生产与装配效率优化, 为低碳模块化智慧建筑发展提供了有效解决方案。通过破解效率瓶颈、构建优化框架与实施针对性策略, 既提升了生产与装配效率, 又保障了低碳性能。未来需持续完善 BIM 应用场景, 强化技术与管理融合, 以推动模块化建筑工业化迈向更高质量发展阶段, 为建筑行业低碳转型提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 王广斌,刘洪磊.BIM 与数字孪生融合的建筑设计协同方法研究[J].建筑学报,2023,61(8):32-38.
- [2] 李惠玲,张其林.低碳模块化建筑全生命周期协同优化技术[J].土木工程学报,2024,57(2):56-64.

- [3] 赵雪峰,陈建国.数字孪生驱动的智慧建筑设计参数动态优化[J].智能建筑与智慧城市,2023(11):45-49.
- [4] 陈晓龙,周建亮.基于 BIM 的模块化建筑多专业协同设计流程重构[J].施工技术,2024,53(5):78-83.
- [5] 刘芳,黄志甲.低碳建筑设计中数字孪生与能耗模拟的集成应用[J].建筑节能,2023,51(9):67-72.
- [6] 张同亿,王淑嫻.模块化智慧建筑全周期数据协同标准体系构建[J].土木工程信息技术,2024,16(3):92-98.