

BIM 驱动下低碳模块化智慧建筑全生命周期能耗模拟 与优化路径研究

马皓喆 周霄 杨楠 杨彬
沈阳城市建设学院 辽宁 沈阳 110000

【摘要】：在“双碳”目标与建筑工业化转型背景下，低碳模块化智慧建筑作为新型建筑形式，其全生命周期能耗管理成为行业关注焦点。依托 BIM 技术的参数化建模、数据集成与协同管理能力，可实现建筑设计、生产、施工、运维及拆除阶段的能耗动态模拟。通过构建全生命周期能耗模拟框架，整合模块化构件参数、智慧系统运行数据与环境影响因子，能精准识别高能耗环节，并从构件选型、系统协同、运维策略等维度形成优化路径，为提升低碳模块化智慧建筑的能源效率、推动建筑行业绿色转型提供技术支撑与实践指引。

【关键词】：BIM；低碳模块化建筑；全生命周期；能耗模拟；优化路径

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.074

引言

随着“双碳”战略深入推进，建筑行业面临从高能耗向低碳化转型的迫切需求。低碳模块化智慧建筑凭借构件预制化、系统智能化等优势，成为实现减排目标的重要载体，但其全生命周期涉及多环节、多要素的能耗协同管理，传统方法难以应对动态化、精细化的管控需求。BIM 技术以其数据集成与可视化优势，为破解这一难题提供了全新可能。通过将 BIM 与能耗模拟深度融合，可打通建筑全生命周期的能耗数据流，为模块化智慧建筑的低碳发展注入技术动能。

1 低碳模块化智慧建筑全生命周期能耗管理的现实困境

1.1 设计阶段：协同性缺失导致能耗基准偏离

设计环节作为能耗管理的源头，需整合建筑形态、模块组合、智慧系统配置等多维度参数，但当前设计流程存在显著的专业割裂问题。建筑、结构、机电等专业基于各自标准开展设计，BIM 模型虽实现了几何信息集成，却未建立能耗数据的实时交互机制，导致模块单元的保温性能、智慧设备的功率参数与整体能耗目标难以协同。例如，模块化构件的标准化尺寸设计可能忽略地域气候差异对能耗的影响，而智能照明、暖通系统的独立选型未考虑与模块空间布局的匹配度，造成设计阶段的能耗模拟结果与实际运行数据偏差较大。同时，低碳目标与模块化施工效率的平衡缺乏量化工具，设计方案可能为追求预制率而牺牲能耗优化空间，形成“模块化优先”而非“低碳优先”的设计导向。模块化构件在工厂预制过程中，能耗管理面临“过程黑箱”问题。生产车间的设备运行、材料加工、模块

组装等环节的能耗数据分散于不同管理系统，缺乏统一的计量与分析平台，难以识别高能耗工序。例如，钢结构模块的焊接工艺能耗占生产总能耗的 30% 以上，但由于未建立能耗与工艺参数的关联模型，无法通过优化焊接电流、时长等参数实现节能。此外，模块生产的质量缺陷会直接放大后续运维阶段的能耗，如预制墙体的密封性能不达标将导致运维阶段空调负荷激增，但当前质量检测多聚焦于结构安全，未将能耗性能指标纳入出厂验收标准，造成生产阶段的质量问题向全生命周期传导。

1.2 施工装配阶段：临时能耗失控与节点性能损耗

现场装配阶段的能耗管理常被边缘化，其临时能耗与永久建筑能耗的界限模糊。模块吊装、节点连接、临时供电等工序依赖大型机械与临时设施，这些设备的能耗未纳入全生命周期能耗统计，且因施工方案缺乏能耗优化设计，易出现设备闲置、重复作业等粗放式耗能现象。更关键的是，模块拼接节点的施工质量直接影响建筑整体能耗性能，如拼接缝的保温处理不当会形成热桥效应，导致运维阶段采暖制冷能耗增加 20% 以上，但当前施工规范对节点能耗性能的施工要求仅作原则性规定，缺乏具体的工艺标准与检测方法，造成节点能耗损耗成为隐性漏洞。智慧建筑的运维依赖传感器、物联网平台及智能控制设备，但其自身能耗与管理收益的矛盾日益凸显。一方面，大量传感器的持续运行产生额外能耗，部分项目的智慧系统能耗占建筑总能耗的 15% 以上，却未实现预期的节能效益；另一方面，能耗数据的采集与分析存在“数据孤岛”，暖通、照明、安防等子系统的能耗数据分散存储，缺乏跨系统的关联分析，导致无法精准定位高能耗区域或设备。

此外，用户行为的不确定性加剧了能耗管理难度，智能系统的自动调节功能与用户个性化用能需求常存在冲突，如空调温度的手动调节可能抵消系统的节能算法效果，形成“智慧不节能”的悖论。

1.3 拆除回收阶段：能耗责任与资源循环割裂

建筑达到使用年限后，拆除与回收阶段的能耗管理缺乏明确标准。模块化建筑虽具备可拆卸特性，但实际拆除过程中，模块与基础结构的连接节点因长期受力发生老化，拆解需消耗大量机械能耗，且部分模块因集成度高难以拆分，导致材料回收率不足 60%。同时，拆除过程中的能耗责任界定模糊，建设方、运维方与拆除单位对拆除阶段的能耗指标缺乏协同约定，且未将回收材料的再加工能耗纳入全生命周期核算，造成“低碳建筑”在生命周期末端的碳足迹被低估，违背全生命周期低碳管理的初衷。上述困境贯穿于低碳模块化智慧建筑的全生命周期，其核心矛盾在于能耗数据的碎片化、管理流程的阶段割裂以及技术标准的滞后性，亟需通过系统性方法构建覆盖全流程的能耗管理体系。

2 基于 BIM 的低碳模块化智慧建筑全生命周期能耗模拟框架构

2.1 框架核心内涵与构成要素

框架以“数据驱动、阶段协同、目标导向”为核心内涵，包含信息层、模拟层与应用层三个层级。信息层依托 BIM 平台搭建全生命周期能耗数据库，整合模块构件参数（如材料热工性能、几何尺寸）、智慧系统参数（如传感器采集频率、设备功率）、环境参数（如地域气候特征、日照时长）及过程参数（如施工机械能耗、运维策略），并通过 IFC 标准实现数据格式统一与跨阶段流转。模拟层基于 BIM 模型的参数化特性，集成多专业模拟工具：设计阶段采用能耗分析软件与 BIM 模型联动，进行负荷计算与方案比选；生产阶段通过工厂 BIM 系统对接生产设备，模拟构件加工能耗；施工阶段结合 4DBIM 模拟进度与资源投入，测算临时设施与机械能耗；运维阶段通过 BIM 与物联网平台数据交互，实现实时能耗监测与趋势预测；拆除阶段基于 BIM 模型的构件拆解路径模拟，评估拆除过程能耗与回收价值。应用层则将模拟结果转化为可视化图表与指标体系（如碳足迹图谱、能耗强度曲线），直接服务于各阶段低碳决策。

2.2 框架运行逻辑与阶段衔接

框架运行遵循“正向建模—逆向反馈”的闭环逻辑，通过阶段间的数据传递实现全生命周期动态模拟。设计阶段，BIM 模型作为能耗模拟的基础载体，需预设模块化构件的低碳性能指标与智慧系统的能耗阈值，形成初始能耗基准模型；生产阶段，工厂将构件制造的实际能耗数据录入 BIM 模型，与设计阶段的预设值比对，通过模拟校准优化生产工艺参数；施工阶

段，借助 BIM 进度模拟与现场能耗监测数据关联，动态调整施工方案以降低临时能耗，并将节点施工质量参数（如密封性能）反馈至 BIM 模型，更新运维阶段的能耗模拟基础；运维阶段，物联网系统采集的实时能耗数据（如设备运行功率、室内环境参数）持续输入 BIM 模型，驱动模拟模型迭代，生成能耗异常预警与优化建议；拆除阶段，基于 BIM 模型的构件可拆解性分析与回收能耗模拟，结合历史数据预测材料再利用的能耗收益，形成全生命周期的最终能耗评估报告。各阶段模拟结果通过 BIM 平台实现横向共享与纵向追溯，确保能耗数据的连贯性与可追溯性。

2.3 框架核心技术支撑与实现路径

框架的落地依赖三大技术支撑体系。参数化建模技术是基础，通过将能耗相关参数（如传热系数、设备效率）嵌入 BIM 构件族库，使模型具备“参数驱动模拟”能力，当构件参数调整时，能耗模拟结果可自动更新。多软件协同技术是关键，通过开发 BIM 平台与能耗分析软件、工厂管理系统、物联网平台的接口，实现数据无缝流转，例如将 BIM 模型中的几何信息与能耗软件的计算引擎关联，直接生成负荷计算结果。可视化与仿真技术是保障，借助 BIM 的三维可视化功能，将抽象的能耗数据转化为彩色热力图、动态能耗流等直观形式，辅助识别高能耗区域；通过施工过程仿真与运维场景模拟，预判潜在的能耗风险。实现路径上，需先建立全生命周期能耗模拟标准流程，明确各阶段数据采集范围、模拟精度要求与成果交付形式；再依托 BIM 云平台构建多方协同环境，使设计方、生产方、施工方、运维方可实时共享模拟数据；最终通过试点项目验证框架的适用性，形成可复制的实施范式。该框架通过系统化整合 BIM 技术与全生命周期管理理念，突破了传统能耗模拟的阶段割裂与数据孤岛问题，为低碳模块化智慧建筑的能耗精准管控提供了可操作的技术路径。该框架通过打破数据壁垒、规范模拟流程、强化阶段联动，实现从设计到拆除的能耗动态追踪与精准测算，为低碳决策提供量化支撑。

3 低碳模块化智慧建筑全生命周期能耗优化路径

3.1 设计阶段：模块化集成与系统协同的低碳预设

低碳模块化智慧建筑的能耗优化需贯穿全生命周期各环节，结合模块化建造的集成特性与智慧系统的调控优势，形成从设计源头到末端回收的全链条优化体系，通过技术协同与流程革新实现系统性降碳。设计阶段的能耗优化需以“模块化协同”为核心，构建“参数化设计—性能模拟—方案迭代”的闭环流程。模块单元层面，基于 BIM 参数化模型开展构件低碳性能优化，优先选用低碳建材与高性能保温材料，通过调整模块轮廓、开窗比例及内部隔断布局，降低建筑本体的传热损失与通风能耗。同时，将智慧设备的安装点位、管线走向纳入模块预制设计，实现设备与模块结构的空间适配，避免后期改造

导致的能耗冗余。系统集成层面，依托 BIM 多专业协同平台，实现建筑、结构、机电与智慧系统的协同优化：例如将智能照明的感应逻辑与模块内功能分区绑定，确保照明功率随空间使用状态动态调整；通过能耗模拟工具比对不同暖通系统与模块组合方式的匹配度，优先选择分布式空调系统以减少管网能耗。整体性能层面，结合地域气候特征优化模块集群布局，寒冷地区采用紧凑式拼接以缩小散热面积，热带地区通过模块错位排列形成自然通风廊道，使模块化建造效率与低碳性能目标形成协同。

3.2 生产与施工阶段：流程精益化与能耗损耗控制

生产阶段的能耗优化需聚焦“工艺革新—质量溯源—能耗标签”的联动机制。工艺优化方面，基于 BIM 生产模拟模型重构构件加工流程，通过工序重组减少设备空载时间，采用光伏供电替代传统工业用电，推动切割、焊接等高能耗工序的低碳化改造。质量管控层面，在 BIM 模型中预设模块能耗性能阈值（如气密性、保温层厚度偏差范围），通过工厂质检数据与模型参数的实时比对，确保构件出厂前即满足低碳运行要求，避免因密封失效、保温层破损等问题导致的后期能耗激增。施工阶段的优化需兼顾装配效率与节点性能：利用 BIM4D 模拟优化吊装顺序与临时设施布置，通过“模块化单元集中堆放—分区流水吊装”模式减少机械往返能耗；针对模块拼接节点，采用预制密封件与保温嵌条替代现场封堵，通过 BIM 模型精确定位热桥风险点，确保拼接缝的保温性能与模块本体一致。同时，将施工阶段的临时能耗（如机械运行、现场照明）录入 BIM 平台，与设计阶段的预设能耗基准动态比对，实时调整施工方案以控制过程能耗。

3.3 运维阶段：智慧系统驱动的动态能耗调控

运维阶段的能耗优化需依托“数字孪生—智能调控—行为引导”的协同体系。基于 BIM 与物联网平台构建建筑能耗数字孪生体，实时采集各模块、各系统的能耗数据（如空调负荷、设备功率、照明时长），通过数据融合分析识别异常能耗点：例如当某模块的采暖能耗显著高于同类区域时，系统可自动关联 BIM 模型中的构件参数与传感器数据，排查是否因密封失效或设备故障导致能耗异常。智能调控层面，基于能耗模拟结

果优化设备运行策略：通过模块内人员密度传感器与智能空调联动，实现负荷随人员数量动态调节；利用智慧电网接口协调模块用电与可再生能源（如光伏板、地源热泵）的供应节奏，优先消纳清洁能源。行为引导层面，借助 BIM 可视化功能将能耗数据转化为直观的动态图表，在建筑公共区域展示各模块实时能耗排名与节能建议，通过用户行为干预进一步降低非必要能耗。

3.4 拆除与回收阶段：循环经济导向的低碳处置

拆除与回收阶段的能耗优化需实现“可拆卸设计—低碳拆除—材料再生”的全流程管控。在设计初期，通过 BIM 模型明确模块的可拆卸节点与连接方式，选用螺栓连接等易拆解构造替代焊接、粘结等永久性连接，为后期拆除降低能耗创造条件。拆除前，基于 BIM 模型模拟拆解路径，优先采用人工与小型机械配合的拆除方式，减少大型设备的能耗与碳排放；针对模块单元，通过 BIM 构件信息追溯其材料成分与性能参数，对仍具备使用价值的模块进行翻新改造，直接用于新建项目以规避重新生产的能耗。材料回收环节，依托 BIM 模型的材料清单，对无法二次利用的模块进行分类拆解，将钢结构、保温材料等进行专业化回收处理，通过再生利用减少原材料生产的隐含能耗，实现建筑全生命周期的闭环低碳管理。上述路径通过各阶段的技术协同与流程优化，将模块化建造的集成优势、智慧系统的调控能力与全生命周期管理理念深度融合，既确保了每个环节的能耗可控，又通过阶段间的衔接联动避免了能耗“转嫁”现象，为低碳模块化智慧建筑的可持续发展提供了系统性解决方案。

4 结语

BIM 驱动下的能耗模拟与优化路径，为低碳模块化智慧建筑的全生命周期管理提供了系统性解决方案。通过整合多阶段数据、精准识别能耗瓶颈、制定针对性优化策略，既能提升建筑设计的科学性、施工的高效性与运维的智慧性，又能推动模块化建筑与低碳目标的深度融合。未来需进一步强化 BIM 与智慧监测系统的协同，完善能耗数据标准，以持续释放技术赋能价值，为建筑行业绿色转型与高质量发展提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 李华,张明.基于 BIM 技术的模块化建筑能耗模拟及优化策略研究[J].建筑节能,2024,52(5):85-90.
- [2] 王强,刘悦.低碳模块化智慧建筑全生命周期碳排放核算体系构建[J].环境科学学报,2024,44(7):402-410.
- [3] 赵刚,孙晓.模块化建筑智慧运维系统的设计与实现——以能耗监测为核心[J].智能建筑与智慧城市,2024(6):77-80.
- [4] 陈晨,周宇.装配式低能耗模块化建筑设计关键技术研究[J].建筑学报,2024(4):66-71.
- [5] 刘畅,杨阳.基于大数据的低碳模块化建筑能耗特征分析与优化路径探索[J].土木工程信息技术,2024,16(3):115-121.
- [6] 吴昊,郑明.模块化智慧建筑中新能源应用对能耗降低的影响研究[J].新能源进展,2024,12(4):387-392.