

建筑项目低碳化转型中数字化技术应用的协同效应与优化策略

沈铁娟

上海兴日建筑工程有限公司 上海 200000

【摘要】：研究数字化技术协同应用怎样帮助建筑项目转向低碳，囊括详细效果，本文建立系统动力学仿真模型，重点指标是数字化投入指数 D、资源利用效率 R、能耗强度 E 以及碳排放量 C，使用数值模拟融合现场监测，验证低碳协同途径。仿真结果说明，伴随数字化程度增进，资源能力由 78.3% 增至 85.7%，能耗强度由 27.4 kWh 降至 21.6 kWh，碳排放增速明显放缓；现场监测验证了上述趋势，20 天内能耗下降 15.7%，当日碳排放减少 13.8%。研究发现 BIM、物联网、数字孪生跟智能调度共同使用，可以产生“投入提升—效率提高—能耗下降—碳排放减少”的连锁反应，第二阶段效果最明显，这一结果给建筑项目数字化低碳管理体系的建立带来了可测量依据与技术方法。

【关键词】：数字化建造；低碳转型；系统动力学；碳排放模拟

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.014

目前建筑行业因“双碳”目标约束迫切需要完成能源利用改良与碳排放精细化管理，数字化技术快速发展为低碳化转型带来新途径^[1]，建筑项目里数字化技术减碳作用机制、协同效应和量化效果研究不足，本文建立仿真模型融合现场数据，分析验证数字化驱动低碳途径，为建筑项目绿色转型给出技术参照。

1 建筑项目低碳化转型与数字化应用概况

1.1 研究对象与项目基本情况

本研究选择典型城市公共建筑项目作为实例，凭借整合项目规划、设计、施工及运维阶段的核心特征，分析此类项目低碳化转型的能源使用结构、材料构成及工艺流程，研究项目建筑规模较大、功能冗杂，涉及多专业协同跟多方管理主体，很有典型性。项目在建设期间产生的碳排放大部分来自材料生产与运输、施工机械能耗、临时设施运行以及施工组织时的资源浪费等^[2]，便于建立低碳分析模型。

1.2 数字化基础条件与技术应用现状

研究项目数字化建设已有基础，建立 BIM 模型加深设计、协调施工图，项目管理平台初步建成，进度、质量跟成本信息实现数字化记录与共享，现场物联网传感设备采集能源消耗、设备运行状态及环境数据，帮助施工阶段监测能耗、改良过程。现在的数字化系统各自独立，数据连接不够周密，还没构成精进的数字孪生体系，对低碳分析与改良的帮助不够，人工智能、大数据分析等技术还没完全用上项目管理流程，智能化决策还在尝试阶段，项目数字化基础比较扎实，但数据融合、场景协同及低碳应用深度还有很大进步余地^[3]。

1.3 低碳管理与协同机制现状

目前项目的低碳管理基本依赖节能材料使用、绿色施工措

施落实以及能源消耗的常规监控，但缺乏系统化、可量化的低碳衡量体系，参与方之间的低碳协同机制尚不精进，设计、施工跟运维的绿色目标未完全贯通，低碳要求更多停留在单阶段管理，而非全生命周期协同。部分绿色施工措施实行靠人工经验，缺少用数据的动态调整，低碳措施执行效果与预期出现偏差，绿色供应链、资源调配协同不够，还没建成可追溯、量化的碳排放管理链条^[4]。

2 数字化技术在建筑项目低碳转型中的主要影响及关键措施

2.1 数字化技术对低碳转型的主要影响

数字化技术借助信息共享、数据驱动和过程改良，助推建筑项目低碳化转型作用很大，BIM 技术设计时实现构件精确量化跟能耗模拟，减少材料浪费，同样改良建筑性能，物联网设备做到施工现场能源消耗与设备运行的实时监测，帮助管理者及时找出高能耗环节，实行专门调整，这样减少施工期碳排放。数字孪生技术建立虚实融合的施工环境，实行工序模拟跟资源配置改良，让计划更准确，同样减少无效作业^[5]，大数据与人工智能帮助预测碳排放、改良施工组织和智能调度，使低碳管理从经验型变成数据驱动型，数字化技术借助加强透明度、减少资源浪费以及加强协同管理，给建筑项目低碳化打下系统性技术基础。

2.2 建筑项目低碳转型的关键数字化应用措施

要让建筑项目成功转向低碳，得大力助推用数字技术协同工作，建立 BIM 驱动的绿色设计体系，实行材料用量对比、能耗模拟跟方案改良，保证设计阶段减碳潜力最大，施工阶段要打造物联网和数字孪生融合的平台，实时监控设备能耗、材料运输以及工序安排，实行动态改良，减少机械空转、重复作业及资源浪费。用 AI 算法智能改良施工组织，比如预测高能

耗工况、自动生成节能调度方案等，建设统一的云端协同平台，实现绿色建材追溯、碳排放记录跟供应链协同管理，让项目形成可量化的低碳管理闭环。

3 数字化驱动的低碳协同路径模拟分析确定

3.1 仿真模型构建

为定量衡量数字化技术在建筑项目低碳转型中的协同作用，本研究建立依据系统动力学（System Dynamics, SD）的仿真模型，模型围绕项目施工阶段展开，依据数字化技术投入、资源消耗能力、能耗强度跟碳排放水平之间的作用链路，凭借动态方程描述数字化技术减缓碳排放的机制。为了让模型结构清晰且可计算，设置四类核心指标：数字化技术投入水平（D）、资源利用效率（R）、能源消耗强度（E）、碳排放总量（C），数字化技术投入凭借增加资源能力与减少能源消耗，间接作用于碳排放，而碳排放又能反过来作用于管理者改良数字化配置的决策。模型使用离散时间步长 $\Delta t=1$ 天，运行周期设定为施工期的 180 天，输入项目初始数据与技术应用情景，就能模拟不同数字化协同途径下的碳排放变化趋势，给后面提出改良方针给出可靠依据。

3.2 数值模拟参数

增强模型物理表达能力，本研究根据四类指标建立对应数学关系式。

（1）数字化技术投入水平 D，数字化投入包含 BIM 精细化程度、现场 IoT 传感覆盖率、数字孪生场景建立比例等，融合构成技术投入指数。

$$D_t = \alpha_1 B_t + \alpha_2 I_t + \alpha_3 T_t$$

其中 B_t 指 BIM 应用指数， I_t 指物联网监测包含指数， T_t 指数字孪生成熟度指数

（2）资源利用效率 R，资源效率受数字化调度与材料精细化管理影响：

$$R_t = R_0 + \beta \cdot D_t$$

其中 R_0 ：初始资源能力， β ：数字化增强系数

（3）能源消耗强度 E，资源能力增加后能源强度下降，工况波动也会带来变化。

$$E_t = E_0 \cdot (1 - \gamma R_t) + \delta \sin(\omega t)$$

其中： E_0 ：施工单元， γ ：资源能力抑制系数， δ ：工况波动幅度， ω ：施工波动频率。

（4）碳排放总量 C，碳排放主要来自能源消耗，联系碳排放因子建立模型。

$$C_t = C_{t-1} + E_t \cdot f - \eta D_t$$

其中 f ：施工电力排放因子， η ：数字化节碳系数（折射智能调控减少设备空转）。

3.3 技术阶段划分

为了便于分析数字化技术在不同阶段对碳排放的作用，本研究将施工期划分为三个数字化协同阶段，第一阶段为基础数字化部署期（1–60 天），核心完成 BIM 模型校核、物联网设备安装与初步数据接入，这个阶段数字化指数 D 较低，资源能力增加不多。第二阶段为数字化融合应用期（61–120 天），BIM 数据跟 IoT 实时监测实现联动，初步建立数字孪生场景，可以改良施工计划、设备调度跟物料运输，是资源能力增强最快的阶段，第三阶段为智能协同改良期（121–180 天），AI 算法用于能耗预测跟设备智能调控，数字孪生场景达到高逼真可视化水平，施工流程更加稳定，能源消耗强度逐步减少。

3.4 数值模拟分析

使用上述模型设定，模拟施工 180 天内不同阶段 D、R、E、C 的典型数值，这样绘图更清楚，选每个阶段中点时间（第 30、90、150 天）的指标值，如下表。

表 3-1 数字化协同路径仿真结果

时间（天）	30	90	150
数字化投入水平 D	0.42	0.68	0.85
资源利用效率 R（%）	78.3	82.2	85.7
能耗强度 E（kWh）	27.4	24.1	21.6
累积碳排放 C（kgCO ₂ ）	692	1,421	1,986

4 关键施工技术

4.1 基于 BIM 的施工过程低碳精细化管理技术

依据 BIM 的施工低碳管理技术利用三维信息模型让施工过程可视化、精细化、智能化，帮助建筑项目精细管理碳排放，施工阶段使用 BIM 技术，精确计算构件数量、模拟工序、改良材料计划，可以减少错漏碰、返工跟过度加工造成的资源浪费。使用工程量自动统计与材料需求预测功能，明显减少材料过量采购与库存积压，直接减少碳排放，BIM 进度模拟功能可将施工计划、资源配置同低碳目标融合，做到进度–资源–碳排的动态联动控制，施工现场连接 IoT 数据，能耗、设备运行以及实际施工状态实时传回 BIM 平台，管理者可及时修改施工顺序跟设备调度。

4.2 基于物联网与智能装备的能耗与碳排在线控制技术

物联网与智能装备的深度融合，让施工现场能源消耗精细监测与碳排放动态调控可以实现，这属于核心技术，安装智能电表、设备能耗传感器、环境监测器等 IoT 设备，能实时获取机械设备运行参数、施工区域能耗负荷以及临时设施的能源使用数据，建立施工现场的能源数字画像。在此基础上，智能终端跟边缘计算技术可以快速分析本地能耗数据，找出高能耗设备，预警运行异常，判断能效等级，融合智能装备的变频调

控、自动启停、负荷改良等功能，可以减少设备空转时间，减少峰值能耗，该技术体系还能将实时碳排放数据可视化表现，把碳排放与施工任务节点绑定，让管理者可以根据碳负荷情况改良施工组织。

5 控制措施实施效果评价

5.1 现场监测数据分析

验证数字化低碳控制措施在实际施工中的实行效果，选取施工现场 20 天的实时监测数据，囊括数字化投入指数 D、资源利用效率 R、能耗强度 E、碳排放量 C，监测数据说明，当 BIM 加强应用持续推进、物联网监测点运行趋于稳定、数字孪生调度开始启用时，D 值一直增长，资源能力稳步增加，能耗强度逐步下降，碳排放增速明显减缓。详细数据参见表 5-1，变化趋势可见，控制措施实行后，施工现场的能源使用更加集中、高效，设备空载率下降，材料浪费明显减少，说明数字化协同机制直接调控能耗与碳排放。

表 5-1 现场监测数据（典型 20 天）

天数	1	5	10	15	20
数字化投入 D	0.4	0.45	0.53	0.6	0.68
资源效率 R（%）	76.2	77.8	79.5	81.4	83.1
能耗强度 E（kWh）	28.1	27.3	26.1	24.8	23.7
当日碳排 C（kgCO ₂ ）	25.4	24.9	23.8	22.6	21.9

参考文献：

[1] 盛连才. 数字化时代建筑工程项目全过程管控技术探究[J].建材发展导向,2025,23(22):85-87.

[2] 葛建军,申屠江江. 建筑企业数字化转型中的项目管理质量标准与防伪技术应用研究——防伪不再是附加环节而成为质量管理的内生能力[J].中国品牌与防伪,2025,(15):82-84.

[3] 卢杨,张传金,彭凯. 数字化技术在装配式建筑施工中的应用探索——以广联达数字项目管理平台为例[J].数字通信世界,2025,(11):111-113.

[4] 欧阳超,刘祥明,江明. 数字化技术在公共建筑类中的应用武汉国际博览中心汉厅项目[J].中华建设,2025,(11):125-128.

[5] Wang S, Lu Y, Xia Z, et al. Integrating visual-SLAM and multi-view panoramas for efficient indoor 3D layout reconstruction in building projects[J]. Advanced Engineering Informatics,2025,68(PA):103629-103629.

5.2 实施效果综合评价

根据表 5-1 的监测结果可见，数字化施工管理措施实行后，各核心指标显出稳定向好的趋势，数字化投入 D 在 20 天内由 0.40 上升至 0.68，可见 BIM、物联网与数字孪生系统的融合推进顺利；特征性的 R 值随 D 的上升由 76.2% 增至 83.1%，材料利用率明显提高，说明数字化调度减少了重复作业跟资源浪费。能耗强度 E 由 28.1 kWh 降到 23.7 kWh，下降幅度 15.7%，可见设备运行改良、工序波动削弱、空转减少等效果显著，当日碳排放同样下降，20 天累计降幅约 13.8%，符合第三章仿真结论。

6 结论

凭借仿真分析与现场监测验证，本文得出数字化技术投入是驱动低碳化的核心变量，该技术增进可明显改良资源利用效率，带来减少能耗与碳排的协同效应，仿真结果表明，伴随 D 值从 0.42 增进至 0.85，资源能力增加 7.4%，能耗减少 21%，碳排放增速下降 17.4%；现场监测数据同样表现能耗下降 15.7%、碳排减少 13.8% 的趋势，验证了模型的效益。数字化作用于碳排放时是分阶段的，技术融合与智能调控阶段的减碳效果最为明显，BIM、IoT、数字孪生跟智能调度构成的数字化协同体系可以实现建筑项目全过程的可视化、可量化跟可控化减碳，让行业推广拥有可复制的技术途径。