

低碳健康建筑（园区）的数字化建设与运营

赵鹏程 曲辰飞 (通讯作者)

天津市建筑设计研究院有限公司 天津 300074

DOI:10.32629/ems.v8i3.18714

[摘要] 在我国建筑机电系统普遍存在异构数据冗余、信息孤岛等问题，导致运维效率低下、能源消耗占比居高不下，传统建设运营模式已难以适配低碳健康建筑的发展需求。为破解上述行业痛点，本文以天津市建筑设计研究院有限公司新建科研业务用房及附属综合楼工程为研究载体，系统阐述了数字化技术在项目设计、建设、运营全生命周期的应用场景，深入剖析了数据采集、集成分析与落地应用的核心技术体系。研究表明，数字化建设与运营模式可有效提升低碳健康建筑的节能水平、运营效率与服务质量，为我国建筑行业数字化转型与低碳健康发展提供了理论支撑与实践样板。

[关键词] 低碳健康建筑；建筑园区；数字化技术；全生命周期；建设与运营；能效提升

引言

建筑领域是能源消耗与碳排放的核心领域之一，我国建筑能耗约占全国总能耗的50%。^[1]在建筑规模持续扩张的背景下，降低建筑全生命周期能源消耗、削减碳排放、严控运行成本，已成为建筑行业发展的必然要求。低碳健康建筑作为建筑行业高质量发展的重要方向，融合了绿色节能、健康舒适、智慧运维等多项新技术措施，对建设与运维工作的专业化、精细化水平提出了更高要求。在此背景下，行业迫切需要通过数字化技术手段，构建一体化的建设运营管控体系，降低建设运维的人力成本与劳动强度，延长设备使用寿命，全面提升建设运维的质量与效率。

基于此，本文以天津市建筑设计研究院有限公司新建业务用房及附属综合楼示范项目为研究载体，系统探究低碳健康建筑（园区）数字化建设与运营的技术路径与实践方法，旨在为行业同类项目的建设、运行与推广提供理论依据、技术支撑和实践经验，助力实现建筑园区的智慧、健康、低碳高质量运行。

1. 项目概况

本研究依托项目为天津市建筑设计院科研业务用房和附属综合楼工程，项目位于天津市河西区，总建筑面积约31300m²。项目凭借先进的设计理念、完善的技术体系与优异的运行效果，斩获多项国内国际权威认证及奖项，包括中国三星级绿色建筑运营标识、中国二星级健康建筑标识、美国LEED金奖、第七届Construction21国际健康建筑解决方案奖国际一等奖等，成为低碳健康建筑领域具有广泛社会影响力的示范样板。

2. 项目数字化建设与运营场景构建

2.1 关键业务环节数字化应用

2.1.1 设计环节：需求导向的数字化前瞻设计

设计环节以低碳健康建筑技术应用为核心切入点，融合BIM、物联网、大数据等数字化技术与建筑工程设计，从智慧运营管理与智慧服务体验两大维度，对项目功能需求、技术路径、管控体系进行系统分析与梳理，构建基于建筑使用阶段需求的前瞻性设计体系。设计过程中，确保建筑设施设备具备统一管控的技术基础，同时满足不同使用主体的智慧感知需求；通过多方案数字化模拟与比选，确定性价比最优的设计方案，最终实现有限场地空间内建筑高效、环保、健康、舒适的设计目标。

2.1.2 建设环节：协同化的数字化施工管控

建设环节依托BIM与物联网技术，搭建建设单位、施工单位、设计单位等多方主体的信息共享平台，打破信息壁垒，大幅提升项目团队的协同工作效率。基于项目建设进度，对BIM模型进行实时更新与迭代，将其应用于现场安装可视化指导、三维场地布置、施工组织进度管控、预留预埋精准定位、三维放样等施工关键环节，实现施工过程的数字化指导，提升施工效率与施工精度。同时，搭建智慧工地管理系统，通过智能识别技术对工地未佩戴安全帽、未穿反光背心、明烟明火等违规行为进行实时识别与自动报警，助力项目安全、高效建设。

2.1.3 运营环节：一体化的数字化智慧运维

运营环节聚焦系统孤岛打通与多源异构数据处理，通过对网络架构、数据采集、数据订阅、数据发布机制的系统性研究，搭建智慧运维管控平台和能碳管理平台，实现建筑各机电系统的联动管理、故障预判与预警诊断，显著提升设备运行效率。采用聚类、关联分析、预测分析等数据挖掘方法，结合建筑实际运行特征确立科学的建筑运行工作模式；实现对低碳健康建筑（园区）运行状态的高效、准确管控。同时，构建三维数字孪生平台，对建筑物物理实体进行精细数字化还

原,实现对低碳健康建筑运行状态的实时、动态、直观的全方位管理。

2.2 核心技术体系构建与应用

2.2.1 数据采集:智慧感知的多维度数据获取

数据采集是低碳健康建筑数字化建设与运营的基础环节,核心依托智慧感知技术,通过各类信息传感设备,按照标准化通信协议实现设备互联互通,完成信息交换与通信,为建筑智能化监控与管理提供数据支撑。本项目基于传感器技术,实现对建筑内环境温湿度、水管压力与压差、空气质量、水箱液位、用能数据、视频监控、身份图像比对、烟雾探测、门磁状态、环境照度、人体感应、电能质量等多维度运行数据的实时、精准采集。

2.2.2 数据集成及分析:标准化的多源数据处理

低碳健康建筑(园区)内部系统类型繁多,各系统数据类型、存储格式存在显著差异,呈现出数据量大、数据类型多、单位数据价值密度低、数据异常与缺失频发、数据缺乏横向关联等特征,为数据的有效利用带来挑战。

针对上述问题,本项目构建了多方法融合的异常数据处理体系,综合采用基于统计、距离、偏离、密度、聚类的5大类异常数据检测方法与数据插补法,实现对异常数据的快速识别、成因分析与有效处理,同时完成缺失数据的合理补全,保障建筑运行数据的准确性与完整性。在此基础上,从数据内在关联出发,开展各系统数据的耦合性与关联性分析,挖掘各智能化系统之间的潜在运行规则,使低碳健康建筑(园区)各系统具备自主推理、自我学习与动态自适应的运行能力。

2.2.3 数据应用:全维度的数字化价值落地

通过对低碳健康建筑运行数据的深度分析与优化挖掘,实现建筑各系统间信息资源的共享互通,推动相关系统的互操作、快速响应与联动控制,有效解决项目智能化系统管理难度大、操作复杂、能源消耗高等运行管理痛点。本项目中,数据应用主要体现在五大核心维度:

(1) 建筑智能化系统集成:基于运行数据分析优化,实现多系统节能管控、联动运行、模式切换、能效监测、维保管理的一体化集成,推动建筑整体实现优化运行;

(2) 建筑智慧运维管理:实现智能化系统与物业管理的深度信息融合,破解建筑运行过程中专业维保人员短缺、设备维护随意性大、设备使用寿命短、运营成本高等行业顽疾;

(3) 建筑能源分析与管理:构建全维度的能源分析管理体系,实现建筑能耗的分类计量、运行趋势追踪、能效精准分析、同环比对比分析、能耗热图可视化分析、能耗帕累托

分析等功能;

(4) 运行分析、评价和管控:实现建筑能效对标、可再生能源利用效率分析、异常用能精准诊断、碳排放量化计算、用户行为节能引导与管理等目标;

(5) 建筑运行性能综合管控:基于多维度数据支撑,对建筑运行性能进行全方位分析、科学评价与精细化管控。

2.3 主要技术创新点

本项目在低碳健康建筑(园区)数字化建设与运营过程中,围绕场景、技术、业务、管理四大维度实现系统性创新,形成了一套可复制、可推广的数字化技术应用体系。

2.3.1 场景技术创新:全生命周期的数字化场景集成应用

本项目实现了数字化设计、平台应用、运行数据挖掘分析等多项技术的融合创新,构建了绿色低碳建筑全生命周期数字化应用体系。为保障建筑后期运营的数字化、可视化,同时将运营阶段的技术优缺点反向反馈于设计环节,形成“设计-运营-优化设计”的闭环管理,项目从建筑全生命周期视角出发,创新构建了基于BIM技术的全生命周期可持续设计技术、运行数据预处理技术、绿色低碳建筑运行性能评价体系技术、平台研发、绿色施工及运行管理技术等场景化集成应用技术。

2.3.2 技术实现创新:多维度的运行数据处理与评价体系

本项目确立了“数据正确为分析基础、直观评价为可视支撑”的技术实现原则,在运行数据处理与评价体系构建方面实现两大核心创新:

(1) 提出运行数据多维度算法:根据建筑运行数据的不同属性与特征,匹配差异化的分析算法;

(2) 建立运行阶段量化评价体系:以层次分析法为理论基础,系统筛选并确定建筑运行关键评价指标,构建科学的指标权重体系,提出多指标综合权重层次分析模型。

2.3.3 业务优化创新:目标导向的建筑运行智能优化体系以实现“用户服务最大化”与“建筑总能耗费用最小化”的双重目标,将其抽象为数学规划问题,即:

$$F(X) = \text{Max}(\text{为用户提供服务})$$

$$F(Y) = \text{Min}(\text{建筑物总能耗费用})$$

为实现上述双重优化目标,项目创新性搭建专家分析系统,融合线上与线下管控手段,综合利用聚类、关联分析、LSTM预测等数据挖掘算法,实现对建筑运行模式的智能识别与能耗的精准预测;制定差异化的线上线下控制策略,实现各系统及设备的协同配合、智能调度,最终推动建筑实现绿色、健康、低碳的高质量运行。

2.3.4 管理机制创新:数字孪生管控的“项目大脑”构建

项目融合物联网、BIM等核心技术,将建筑现场各系统与硬件设备全面集成至统一的三维数字孪生平台,实现建筑运行数据的实时汇总、建模分析与集中管控,构建成标准化的数据中心与可视化数据看板。通过数据看板可整体呈现项目各要素的实时运行状态与关键指标数据,同时对工地施工安全、施工进度、施工质量、绿色施工等相关数据进行多维度分析,实现项目风险的智能识别与提前预警。

3. 项目数字化建设与运营价值成效

本项目通过数字化技术的全生命周期深度应用,在成本管控、运营效率、服务质量三大维度取得了显著的量化成效,充分验证了数字化建设运营模式在低碳健康建筑(园区)中的可行性与优越性。

3.1 高效成本管控: 显著提升建筑节能水平

项目对示范项目水、暖、用电量进行全维度数据采集、处理、分析,通过平台的集中管控,根据《民用建筑能耗标准》中相关条文进行计算,可得修正后的非供暖总能耗的实测值为 $57.95\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。《建筑能效标识技术标准》可计算本项目相对能耗指标约束值的节能率为 20.04% 。^{[2][3]}核算过程如下:

非供暖能耗的计算公式如下:

$$E_{oc} = E_o \times \gamma_1 \times \gamma_2$$

式中, E_o 为所述办公建筑非供暖能耗实测值; E_{oc} 为所述办公建筑非供暖能耗实测值修正值; γ_1 为所述办公建筑使用时间修正系数; γ_2 为所述办公建筑人员密度修正系数;

相对节能率的计算公式如下:

$$\eta = \left(\frac{B_0 - B_1}{B_0} \right) \times 100\%$$

式中, η 为相对节能率; B_0 为建筑当年单位建筑面积能耗 ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$) 约束值; B_1 为建筑全年单位建筑面积能耗 ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$) 实际值。

3.2 运营效率提升: 大幅精简运维人力成本

项目通过应用智慧运维管控平台、能碳管理平台、三维数字孪生平台等数字化系统的协同应用,实现了运维人员的大幅精简,总计节省运维人员12人以上。通过数字化管控实现消防、安防控制人员的岗位合并,由一组人员同时承担两大功能的管理工作,减少了原消防/安防功能房间2人值守、三班轮换的人力投入,共精简6人;通过在消防安防控制室实现变电站远程监控,达成变电站无人值守运行,减少了原变电站2人值守、三班轮换的人力投入,再精简6人。

3.3 使用服务改善: 有效降低建筑运行碳排放

项目依据国家碳排放计算及计量标准与体系,对建筑运行阶段冷热源、照明、电梯、可再生能源利用、碳汇等环节的碳排放量进行系统性研究与分析。通过数字化集成平台实现建筑运行数据的自动采集、存储与分析,完成建筑运行阶段碳排放的精准量化计算,碳排放量化公式为:

$$G(\text{碳排放}) = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

式中, x_1 表示可再生能源, x_2 表示碳汇, x_3 表示冷热源, x_n 表示其他相关量。

基于碳排放量化分析结果,项目结合建筑运行实际提出针对性的优化运行策略,从系统智能运行与物业管理两大维度实现碳排放的优化控制,预期可减少5%以上的建筑运行碳排放,有效推动建筑实现低碳运行,提升了建筑的绿色健康服务品质。

4. 小结

本研究以天津市建筑设计研究院科研业务用房及附属综合楼这一低碳健康建筑示范项目为载体,系统探究了数字化技术在低碳健康建筑(园区)全生命周期建设与运营中的应用路径与实践方法。研究表明,数字化技术与低碳健康建筑的深度融合可有效破解传统建筑建设运营中的能耗高、效率低、运维难、碳排放高等行业痛点。

未来,低碳健康建筑(园区)的发展需进一步深化数字化技术的融合应用,持续提升建筑全生命周期的低碳化、智慧化、健康化水平,为我国建筑行业向高质量发展转型提供有力支撑。

[参考文献]

- [1] 卢梅章琦. 低碳视角下装配式建筑施工项目多目标优化研究[J]. 2025.
- [2] GB/T51161-2016 民用建筑能耗标准 建筑规范[M]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] JGJ/T288—2012 建筑能效标识技术标准[M]. 中国建筑工业出版社, 2013.
- [4] 徐栋, 蒋博雅. 低碳智能建筑全生命周期智能化设计策略研究 [J/OL]. 智能城市, 2026, (01): 14-19 [2026-02-10].
- [5] 朱楚南, 龙慧儿, 任宇林, 等. 夏热冬暖地区某超高层建筑零碳运营实施路径与实例研究 [J/OL]. 暖通空调, 1-15 [2026-02-10].
- [6] 朱正. 绿色建筑全生命周期碳排放核算与控制路径研究 [J]. 新城建科技, 2025, 34 (11): 49-51.