建筑智能化技术在公共建筑与产业园区碳减排中的应用瓶颈与对策研究

蔡天虹　王成祥

机械工业第六设计研究院有限公司　河南　郑州　450000

摘　要：建筑智能化技术为公共建筑与产业园区碳减排提供了关键技术支撑。公共建筑依托实时感知与动态调节实现需求侧响应，产业园区借助多能互补与协同调度提升整体能效。本文通过梳理两类场景应用现状与共性特征，分析技术、运维、体系、成本四个层面的核心瓶颈，提出涵盖技术优化、运维完善、标准健全与成本管控的针对性对策，进而构建差异化优化路径与协同发展框架，为建筑领域低碳转型提供参考。

关键词：建筑智能化；碳减排；公共建筑；产业园区；优化路径

引言：建筑运行阶段碳排放占全社会终端碳排放较大比重，公共建筑与产业园区作为两类主要用能载体，碳排放强度居高不下。智能化技术凭借数据采集、算法分析与自动控制等方面的优势，正逐步渗透至建筑能源管理与设备调控环节。然而当前智能化碳减排实践仍面临技术适配困难、运维能力不足、标准体系缺位与成本回收周期较长等现实约束，制约了规模化应用与减排潜力释放。因此有必要系统审视两类场景的差异化需求与共性挑战，探索切实可行的突破方向。

1 建筑智能化技术在碳减排中的应用现状

1.1 公共建筑智能化碳减排应用现状

公共建筑智能化碳减排实践以大型商场、医院、交通枢纽及办公写字楼为主要载体。物联网感知体系与建筑设备管理系统深度整合，使照明、空调、电梯等主要耗能设备形成动态调节能力。建筑运营阶段，智能化系统依托室内外环境参数采集与负荷预测算法，能够有效压缩暖通空调系统无效运行时长。智能照明结合人员定位与自然采光变化自动调节照度输出，降低日间非必要电力消耗。能源管理平台对分项能耗数据进行实时追踪与异常识别，为运营团队提供清晰的节能优化靶向。部分领先项目引入数字化孪生技术，在虚拟空间模拟不同控制策略的碳减排效果，择优部署于实际物理系统。公共建筑使用者密度高、用能模式复杂，智能化技术恰好应对这类动态多变的调控需求，形成以需求响应为核心的碳减排运行机制。

1.2 产业园区智能化碳减排应用现状

产业园区智能化碳减排覆盖范围从单栋建筑扩展至多建筑群及配套设施。园区级能源管控平台统一接入各企业、各厂房的水、电、气、热等各类能耗数据，运用数据分析方法识别能效洼地。微电网管理系统协调分布式光伏、储能装置与充电桩运行，根据电价信号与负荷曲线优化本地绿电消纳比例。智能化系统还延伸至生产辅助环节，包括压缩空气系统、循环冷却水系统及废气处理装置的联合优化调度，降低园区公用工程碳排放强度[1]。部分园区建立碳排放在线监测网络，将实时排放数据与生产计划联动，支持运营方在产量调整时提前预判碳排放波动。产业园区供能用能结构更为复杂，智能化技术贯穿源网荷储各环节，实现多能互补与梯级利用，提升整体能源利用效率

1.3 两类场景智能化碳减排应用共性特征

公共建筑与产业园区在智能化碳减排应用中呈现若干共通属性。两者均以数据驱动决策作为核心技术逻辑，凭借完善的传感器网络与边缘计算节点支撑实时响应。管理层面均注重将智能化系统嵌入日常运营流程，而非作为独立技术模块单独运行。碳减排目标均与节能降本形成正向关联，智能化投入带来的能耗下降直接降低运营支出。两类场景都面临设备选型多样化与通信协议差异化的客观现实，要求智能化平台具备较强兼容性与扩展能力。人员素养与组织架构匹配度同样构成共同关注点，智能化系统效能的充分发挥离不开运维团队数字技能支撑。

2 建筑智能化技术碳减排应用核心瓶颈

2.1 技术层面瓶颈

智能化系统与既有建筑设备的对接存在协议壁垒与接口不匹配问题，存量建筑中大量老旧设备缺乏数字化通信能力，升级改造涉及繁重的布线工程与控制器更

换。边缘计算节点处理实时数据的算力冗余不足，当测点数量大幅增加时出现数据延迟与丢包现象。不同厂商提供的子系统间数据格式与语义模型各异，跨系统联动时面临复杂的数据映射与逻辑转换任务。碳减排量化算法模型精度受限于训练数据集规模与质量，对于特殊天气条件或非常规运行模式，预测偏差显著增大。数字孪生建模过程依赖大量人工标注与参数校准，模型迁移至新场景时泛化能力明显下降。

2.2 运维层面瓶颈

运维团队对智能化系统的理解往往局限于操作界面层级，对底层控制逻辑与数据流转路径缺乏深入认知，异常发生时难以快速定位根因。碳减排优化策略与实际建筑使用行为之间存在偏差，用户侧随机性活动导致预设控制模式失去最优性。多套智能化子系统分别由不同供应商交付，运维人员需面对多套操作手册与故障诊断流程，日常管理工作量成倍增加。系统升级或设备更换时，新旧版本之间的配置参数与数据库结构难以平滑过渡，造成历史数据断层与模型重新训练成本[2]。一线操作人员流动频繁，智能化系统运行经验无法有效沉淀为组织知识。

2.3 体系层面瓶颈

碳减排标准体系中智能化技术评价指标缺失，现有绿色建筑评价体系对系统响应速度、数据精度、联动可靠性等关键性能参数缺乏明确规定。项目审批与验收流程未将智能化碳减排效果纳入强制性考核范围，导致设计阶段优化动力不足。建筑行业与信息技术行业之间专业术语与工作流程差异明显，跨领域协作时沟通效率偏低。碳交易机制与智能化减排行动之间尚未形成有效衔接，智能化实现的减排量缺乏核证方法与交易通道。行业数据共享与互操作规范建设滞后，不同项目间智能化碳减排经验难以复制推广。

2.4 成本层面瓶颈

智能化碳减排项目初始投资中硬件设备、软件授权与系统集成三项成本占比均较高，对于存量建筑改造而言还需额外承担施工期间正常运营受影响带来的隐性支出。碳减排收益转化为经济回报的周期较长，能源费用节约额需数年累计才能覆盖前期投入。智能化设备更新换代速度较快，折旧年限显著短于建筑本体的使用寿命，全生命周期内需多次追加资金进行系统升级。按建筑面积或功能分区独立部署智能化系统的传统模式导致重复建设问题，各子系统硬件资源利用率偏低。

3 突破智能化碳减排应用瓶颈的对应对策

3.1 优化核心技术体系，提升适配集成能力

面向异构设备和多厂商系统的集成需求，开发标准化通信网关与协议转换中间件，屏蔽底层差异，为上层应用提供统一数据访问接口。边缘计算节点采用模块化算力架构，依据测点规模灵活扩展处理能力，保障大规模数据流实时处理。建立通用数据语义模型，定义统一的设备描述规范与控制指令集，降低跨系统联动复杂度。碳减排算法引入迁移学习与小样本学习方法，减少对大规模标注数据的依赖，提升模型在不同建筑类型中的泛化表现[3]。数字孪生平台采用自动化数据清洗与参数辨识流程，缩短模型构建周期并降低人工介入强度。

3.2 完善运维管理模式，夯实落地运行基础

针对运维人员技能短板，搭建分层培训体系，聚焦数据解读能力与故障处置能力的定向提升。构建智能化系统运行知识库，将历史故障案例与解决方案结构化存储，辅助现场人员快速检索应对措施。建立用户行为预测模块，结合占用感知数据动态调整控制策略，减小随机活动对优化效果的影响。制定标准化系统升级流程与数据迁移规范，确保新旧版本平滑切换且历史数据完整保留。推行运维数字日志制度，以结构化方式记录每日运行参数与操作动作，为长期优化积累可分析数据资产。

3.3 健全融合发展体系，规范应用发展标准

将智能化技术核心性能指标纳入绿色建筑评价与工程验收标准体系，明确系统响应能力、数据精度等级、联动可靠性等量化要求。推动建筑行业与信息技术行业联合编制智能化碳减排技术导则，统一专业术语与工作流程，提升跨领域协作效率。探索智能化碳减排量核证方法学，建立与碳交易市场的对接机制，为智能化产生的减排效果赋予明确经济价值。构建行业级智能化碳减排案例数据库，制定数据采集格式与质量分级规范，支撑经验成果的系统性积累与复用推广。

3.4 优化成本管控模式，提升效益转化水平

智能化碳减排项目采用分期部署与模块化投入策略，优先实施投资回收期短、减排效果明显的子系统，形成早期收益后再推进后续模块建设。探索能源费用托管与节能量保证型合同能源管理模式，将智能化投入纳入运营成本分期回收。推动园区级或区域级智能化管控平台集中建设，多栋建筑或多家用户共用数据处理与策略优化资源，显著降低单栋建筑智能化改造边际成本[4]。建立全生命周期成本核算框架，将碳减排带来的碳交易收益与环境合规成本节约纳入投资回报评估范

围，更完整地反映智能化技术综合经济价值。

4 公共建筑与产业园区差异化优化路径

4.1 公共建筑场景智能化碳减排优化路径

公共建筑智能化碳减排工作重点在于提升需求侧动态响应水平。针对人员密度实时变化与室外气候波动因素，可以部署轻量化负荷预测模块，在分钟级时间尺度上灵活调整空调末端设备与新风系统输出功率。智能照明系统适宜采用分布式控制架构，各个独立区域依据实际占用状态与桌面照度实测数值自主做出调光指令决策。2025 年完工的某省级机关办公楼改造项目就是一个典型，该项目通过层间传感器、电动调节阀和变频水泵构建智能温控网络，使空调能耗下降 20%以上，同时引入毫米波雷达 AI 网关与边缘计算技术，结合温湿度与照度传感器，实现照明能耗下降 40%以上。建筑能源管理平台需要引入异常能耗实时报警与诊断功能，帮助运营团队快速锁定低效运转设备与异常运行模式。面向大型公共建筑复杂多样的用能行为特征，开发用户舒适度反馈接口也很有必要，收集使用者主观感受数据用作控制策略优化依据，在节能目标与环境品质保障之间找到合理平衡点。

4.2 产业园区场景智能化碳减排优化路径

产业园区智能化碳减排应把着力点放在多能协同调度能力构建上。部署园区级能量管理系统，把光伏发电预测、负荷需求预测与储能装置状态信息整合起来，制定未来 24 小时各能源转换环节最优运行计划。2025 年首批国家级零碳园区建设名单正式落地，52 个园区进入试点序列。以某重化工园区为例，朗新科技与地方企业联合打造的能碳数智化运营管理服务平台，打破了过去能耗数据长期互为孤岛的局面，动态感知与精准预测使数据准确率达到 98%以上，园区平均能效提升 20%，碳排放总量下降 15%。针对生产环节中压缩空气、蒸汽、冷却水等二次能源介质，建立压力流量温度多维参数联动优化模型，降低公用工程系统整体电耗水平。碳排放在线监测数据与生产执行系统打通之后，生产调度人员能够依据不同订单组合下的碳排放强度数值做出工艺路线选择[5]。园区智能化平台需预留各企业自有能源管理系统接入接口，实现园区整体管控与企业内部精细化调节之间的分层协作。

4.3 两类场景协同低碳发展路径

公共建筑与产业园区在智能化碳减排进程中存在互补互促关系。公共建筑在人员行为感知技术、舒适度控制策略、需求响应机制等领域积累的算法成果，可以迁移至产业园区办公配套区域加以应用。产业园区在多能源协调调度方法、分布式储能管理经验、碳排放在线监测体系等方面形成的技术方案，对大型公共建筑群落也具有借鉴价值。雄安创新中心项目立足国家双碳目标，积极探索能源供应清洁化、能源利用低碳化、能源配置柔性化和园区管理智能化，打造清洁节能低碳、负荷柔性互动、电碳协同交易、园区智慧运营等典型示范场景。

结束语：公共建筑与产业园区因用能特征、管理对象与调控尺度的差异，在智能化碳减排路径上各有侧重。公共建筑应强化需求侧动态响应与使用者行为适配，产业园区则需着力构建多能协同调度体系。两类场景在算法模型、数据资源与平台功能层面具备互促条件，通过技术共享与经验流通可进一步提升减排成效。后续工作中应持续关注核心技术迭代与运维能力建设，推动智能化碳减排从单点示范向规模化应用拓展。

参考文献

[1] 汤冰. 智能化技术在建筑节能减排工程中的应用与前景预测 [J]. 新材料·新装饰,2025,7(1):94-97.

[2] 陈坤龙. 智能建筑工程技术在绿色节能中的应用分析 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2026,(2):021-024.

[3] 朱荣鑫, 刘茂林, 李嘉耘, 等. 被动式技术在绿色公共建筑中的应用情况及碳减排贡献分析 [J]. 绿色建筑,2025,17(3):1-5+10.

[4] 徐凯. 节能减碳技术在公共建筑工程中的应用分析 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2024,(12):181-184.

[5] 张江辉, 谷朝督, 何燕, 等. 双碳背景下传统产业园区绿色低碳转型路径分析 [J]. 广州化工,2026,54(5):1-4.