

绿色建筑项目碳足迹实时监测与成本效益优化模型研究

李座有¹ 林波^(通讯作者)² 冯官男³

1. 四川融威建筑工程有限公司 四川省 成都市 610095

2. 中国石化销售西藏分公司 西藏自治区 拉萨市 850000

3. 江西灵旭建筑工程有限公司 江西省 九江市 332200

【摘要】: 面向绿色建筑全生命周期碳管理, 本文提出一套以物联网与流式计算为底座、与数字孪生深度耦合的碳足迹实时监测与成本效益优化方法。监测侧在建材、施工与运营三阶段布设多源计量与环境感知, 设备层采用 BACnet 与 Modbus 接入, NB-IoT 与 LoRaWAN 回传, 边缘网关完成校时、清洗与异常识别, 高频数据经 Kafka 与 Flink 沉淀至时序库, 并由 BIM 驱动的空间对象与排放因子库完成活动数据映射与碳因子匹配。优化侧以净效益最大化为目标, 将分时能源价格、碳价与时段排放因子动态注入约束求解, 形成与舒适度和设备可用性相协调的日内调度策略。在上海闵行某面积 15000 平方米的办公建筑中落地应用, 年尺度碳排放由 1200 降至 960 tCO₂e, 降幅 20%, 年度净收益由 50 万元增至 65 万元, 提升 30%。结果表明, 该方法可在五分钟粒度实现监测与调度闭环, 兼具可复用性与可迁移性。

【关键词】: 实时碳监测; 数字孪生; 成本效益优化; 流式计算; 绿色建筑

0 引言

建筑部门是实现双碳目标的重要领域, 然而传统依赖账单抄表与人工盘查的碳核算模式在时间与空间维度均存在明显滞后, 且排放边界与设备台账关联松散, 导致运行调度难以依据实时碳足迹进行闭环优化。负荷在天气与占用扰动下呈现显著波动, 传感器漂移与缺失进一步放大了瞬态识别难度, 这些问题制约了碳资产管理与日内经济性调度的协同。随着物联网、边缘计算与流式计算的成熟, 结合 BIM 与排放因子库构建数字孪生已具备可行性, 为将高频能耗与设备状态映射到实时碳排放提供了技术路径。本文在此背景下提出一套覆盖建材、施工与运营阶段的实时监测体系, 构建以净效益为目标的优化模型, 并通过统一的流式数据视图与耦合机制实现监测与调度的一体化闭环。研究旨在打通碳核算与运行优化之间的信息鸿沟, 使碳资产与现金流在相同口径下联动评估, 为绿色建筑在多变价费与碳价环境下的精细化管理提供工程化范式。

1 绿色建筑项目碳足迹实时监测的理论基础

在绿色建筑情境下, 碳足迹可被界定为项目全生命周期温室气体排放量的二氧化碳当量表征, 涵盖材料生产与运输、施工机械与临建设施用能、运营阶段电力与热力消耗、维护更新以及拆除与再利用等环节, 同时涉及现场燃烧的直接排放、购入电力的间接排放与上游供应链排放。结合建筑运行的负荷波动特性, 实时监测需把物联网感知作为底座, 通过电力计量装置、燃气流量计、冷站与空调末端传感器以及室内环境采集节点进行数据采集, 选用 BACnet 与 Modbus 进行设备级接入, 借助 NB-IoT 与 LoRaWAN 完成低功耗广域互联, 并由边缘计算网

关开展时钟校准、数据清洗与异常识别。面向数据汇聚与计算, 需把 Kafka 流式管道与 Flink 作业用来承载高频数据, 采用时序数据库沉淀多尺度序列, 结合 BIM 驱动的数字孪生模型与排放因子库进行活动数据映射与碳因子匹配。进一步观察发现, 现有监测多依赖账单抄表与人工盘查, 数据时效滞后且空间粒度粗, 排放边界划定与设备台账关联松散, 传感器漂移与缺失处理规则不统一, 使得动态负荷响应、天气与占用修正以及工况切换中的瞬态变化难以被捕获, 碳核算与运行调度之间的闭环难以建立。

2 碳足迹实时监测驱动的成本效益优化模型构建

2.1 碳足迹实时监测模块设计

本研究把监测覆盖扩展至建材生产、施工建造以及运营维护三阶段: 建材生产与运输环节依靠供应商 EPD、电子磅单与车辆里程获取活动数据; 施工阶段围绕工程机械燃料与临电用能进行采集; 运营阶段围绕电力、热力与燃气以及冷站与空调末端负荷进行采集。为增强可追溯性, 传感器部署采取源端分层方案: 在 10 kV 出线与楼宇分项回路选用三相电能表, 在冷机、泵与空气处理机组选用分回路电表, 在换热站与热泵配置热量表, 在燃气支路配置超声燃气表, 在柴油储罐与发电机设置液位或流量采集, 在挖掘机与吊装设备接入 OBD 遥测, 同时在重点房间设置环境与占用传感器, 并在屋顶设置气象站。数据采集与传输采用现场总线与广域物联协同: 设备侧以 BACnet 与 Modbus 接入, 现场至网关以 RS-485 与以太网承载, 远端回传依靠 NB-IoT 与 LoRaWAN, 边缘网关开展 NTP 校时、去噪、量纲统一与异常识别, 把高频数据写入 Kafka, 借助 Flink 流处

理后沉淀至时序库；设备台账与BIM空间对象进行映射，并与排放因子库进行能源类型与时间分区匹配，使能耗转化为碳活动数据，见图1。针对预处理算法，流程包含时间对齐与重采样、越界与突变识别并剔除噪声、缺测插补、漂移检测与修正以及变工况切片标注：短缺不超过5 min的区段采用邻近值平滑插补，较长缺口依靠气象与占用率驱动的回归估计，修正结果以标签固化便于追溯。

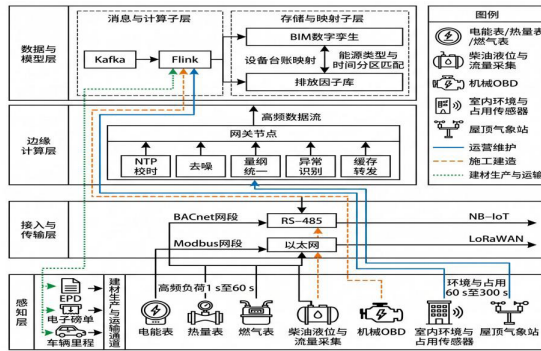


图1 碳足迹实时监测模块架构图

2.2 成本效益优化模块设计

鉴于监测模块已把能耗、负荷以及碳因子序列在时间与空间维度上打通，本模块围绕三类指标开展量化并与价费信号进行实时映射。碳减排成本界定为在策略执行期产生的边际改造支出、增量维保支出以及数据服务支出之和，并折算到单位减排以便跨项目比较。节能收益由经天气与占用修正的基线能耗与实测能耗差值乘以分时电价、热价以及燃气价得到，同时把需量响应补偿计入现金流。碳交易收益由在核定边界内形成的净减排量按市场碳价结算，并扣除撮合与清算费用，收益口径与减排口径保持一致。

本研究立足实时调度场景，把净效益最大化设为优化目标，决策变量覆盖冷站出水设定、泵阀频率、末端送风以及储能充放，收益在年内离散时段进行累计。约束方面，项目碳排放限额以电力与燃气活动数据映射的年度排放总量计入，年度成本预算以改造支出与运行费用合并核算，超限方案不被采纳。同时把分时能源价格与碳价以及排放因子随数据流进行动态刷新，使优化对市场与负荷波动保持敏感性。

$$\max_{\{u_t\}} \sum_{t=1}^T \left[\pi_t (p_t^{base} - p_t(u_t)) + \lambda_t \gamma_t (p_t^{base} - p_t(u_t)) - C_{ab}(u_t) \right]$$

其中， u_t 为时段内的运行与调度策略向量， T 为优化时段数， p_t^{base} 为经天气与占用修正的基线能耗， $p_t(u_t)$ 为在策略作用下的实测能耗， π_t 为分时能源价格， λ_t 为碳市场价格， γ_t 为时段排放因子， $C_{ab}(u_t)$ 为相应的减排成本函数。

2.3 模块间耦合机制设计

鉴于监测与优化需在时空二维保持一致性，本研究把流式

能耗、设备负荷、室内环境、占用率以及时段排放因子汇聚为统一输入视图，依靠Kafka主题对电力、热力、燃气与设备状态分区，借助Flink生成5 min滚动均值、爬坡率、排放指示与舒适度指示，使优化器在每个决策步获取可用的状态估计与扰动特征。数字孪生把设备台账与空间分区映射到回路级与房间级，使冷站出水设定、泵阀频率、末端送风与储能充放等决策变量能够与具体计量点一一对应，并把温湿度、二氧化碳浓度与设备可用性约束同步注入优化问题。需重点关注的是，优化结果不仅下发至楼控系统执行，还会把监测重点进行动态重配：对被调控的回路提升采样频率，对关键计量点启用冗余通道，对出现漂移预警的传感器触发校准工单，同时在负荷剧烈变化时开启高频临时采集策略，以提高辨识识别精度。由此推导一条闭环路径，即异常识别把可信度权重回写到数据流，优化器按权重降噪并启用虚拟传感器替代缺测量，若数据完整性下降到阈值则切换保守策略以保障运行边界。面向模型动态更新，边缘侧持续进行机组性能曲线与基线能耗的在线辨识，中心侧运用滑动窗口对价费信号与排放因子进行再估计，概念漂移检测触发Flink作业替换与模型版本切换，结合版本库与灰度发布把更新影响限制在选定区域，所有参数与设定变更均沉淀为可追溯的操作链路。

3 模型的应用效果评估

3.1 案例项目的模型应用

选取上海市闵行区紫竹高新区一座建筑面积15000 m²、运营年限5年的绿色办公建筑作为应用对象。鉴于该项目冷站采用电制冷与燃气热泵并联的混合方案，研究把运营阶段作为观测窗口，围绕电力、热力与燃气活动数据开展采集，并把回路级负荷、室内环境与占用率纳入统一监测视图。现场在10 kV出线与楼宇分项回路加装三相电能表，在冷机、泵与空气处理机组侧配置分回路电表与热量表，在燃气支路设置超声燃气管，同时在重点房间投放温湿度与二氧化碳传感器并在屋顶布设气象站。设备侧以BACnet与Modbus接入，现场至网关依靠RS-485与以太网，远端回传选用NB-IoT与LoRaWAN，边缘网关完成校时、去噪、量纲统一与异常识别，把高频数据写入Kafka并由Flink生成5 min滚动特征后沉淀至时序库。基于BIM驱动的数字孪生把设备台账与空间对象进行映射，并与排放因子库按能源类型与时间分区进行匹配，结合天气与占用修正得到基线能耗序列，缺测插补与漂移修正以标签固化便于追溯。优化模块在此数据底座上运行，以净效益最大化为目标构建运行策略集，把冷站出水设定、泵阀频率、末端送风与储能充放作为可调变量，价费信号与时段排放因子按数据流动态刷新，舒适度、设备可用性与年度碳排放约束同步注入求解。优

化结果经楼控系统下发，并驱动监测侧对受控回路提升采样频率与冗余通道配置，形成数据可信度回写与保守策略切换的闭环，使该项目在日内 5 min 步长时序上完成监测与调度的一体化运行，为后续效益量化提供可复现的操作链路。

3.2 应用效果的量化分析

鉴于前述统一边界与五分钟滚动基线，本节把年尺度汇总口径下的碳与经济指标进行对比，以刻画监测驱动优化的可用性与可迁移性。见表 1，碳排放由 1200 tCO₂e per year 降至 960 tCO₂e per year，减幅 20%；年度净收益由 50 万元 per year 提升至 65 万元 per year，增幅 30%。变化的直接缘由在于，优化把冷站出水设定、泵阀频率与末端送风进行协同，并把储能充放与分时电价以及时段排放因子进行联动，使高排放系数与高电价时段的负荷得到外移。进一步观察发现，净收益口径按照能源费用节省与需量响应补偿以及碳交易收益的合并计算，并扣除边际改造与维保以及数据服务支出，因而具备跨年份与跨项目的可比性。需重点关注的是，该模型在上海闵行紫竹高新区的部署把 Kafka 与 Flink 当作数据流底座，把 BIM 数字孪生用于设备到空间的映射，技术栈与流程的标准化程度较高，可迁移至电制冷与燃气热泵并联的园区办公建筑，同时依靠排放因子与价费信号的动态刷新来维持场景适配性。由此推导，实时监测与成本效益优化的耦合不仅在目标建筑形成可追溯的碳资产与现金流改善路径，还为区域级能源管理平台提

供可复用的数据算子与运维流程。

表1 案例项目优化前后指标对比表

指标	优化前	优化后	变化幅度
碳排放 tCO ₂ e per year	1200	960	-20%
年度净收益 万元 per year	50	65	+30%

4 结语

本文面向绿色建筑碳管理的实时性与可执行性需求，提出以物联网感知、流式计算与数字孪生为核心的监测优化一体化框架，并在实际办公建筑中验证了其对于碳与经济绩效的显著改善作用。方法层面，监测模块通过源端分层计量与标准协议接入，结合边缘预处理与时序沉淀，实现活动数据到碳因子的稳定映射；优化模块将分时电价、碳价与排放因子联动纳入求解，并由舒适度、设备可用性与年度排放限额构成多重约束；耦合机制通过统一输入视图、可信度回写与虚拟传感器策略，在数据质量波动时维持调度鲁棒性。工程层面，标准化的数据栈与流程便于跨项目迁移，能够为园区级能源管理平台提供可复用的数据算子与运维方法。未来工作可在三方面深化：其一，进一步贯通上游供应链碳数据与本地实时监测，提升全生命周期口径的一致性；其二，引入不确定性量化与鲁棒优化，增强在极端天气与市场波动下的决策稳定性；其三，拓展至多能互补与区域级协同场景，结合需量响应与储能资产，实现更大尺度的碳与经济效益协同提升。

参考文献

[1]王倩. 绿色金融视角下优化建筑企业负债结构的研究[J]. 产权导刊, 2025, (07): 60-62.

[2]孙德宇, 高雨识, 李彩宇, 姜凌菲, 卢笛, 徐伟, 于震. 建筑领域碳交易发展现状与研究趋势综述[J]. 建筑科学, 2025, 41 (04): 6-13+22.

[3]刘蕾, 程小乖, 穆心彤, 窦臻璐, 辜雪钿, 张立国. 建筑碳排放计量中能源碳排放因子取值研究[J]. 建筑科学, 2025, 41 (06): 110-117.

[4]刘自敏, 李莉, 李兴. 中国碳市场的价格有效性评估与优化设计研究[J]. 统计与信息论坛, 2025, 40 (01): 77-91.

[5]崔晶瑶. 绿色建筑设计理念与节能技术的深度融合创新[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (22): 100-102.

[6]林继业, 张璐. 物联网在智能绿色建筑设计中的应用研究[J]. 绿色建造与智能建筑, 2025, (07): 84-86.

[7]李航. 绿色施工技术在房建施工中的标准化应用实践[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (22): 196-198.

[8]刘冰, 刘孝海, 朱丽, 纪雨辰. 多层次灰色体系下光伏建筑改造项目评价研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46 (06): 478-485.

[9]赵会达. 绿色建筑与可持续发展视角下的房地产业投资风险分析[J]. 中小企业管理与科技, 2025, (03): 116-118.

作者简介：李座有（1981—），男，汉族，本科，研究方向为建设工程。