

“双碳”目标下数字建筑能源管控平台创新：基于负荷预测算法的光伏－储能－微网协同控制优化

霍励

广东省电信规划设计院有限公司，广东 广州 510630

DOI:10.61369/ERA.2025100038

摘 要： 本文围绕数字建筑能源管控平台创新展开研究，核心聚焦基于负荷预测算法的光伏－储能－微网协同控制优化。研究提出了一种基于负荷预测算法的光伏－储能－微网协同控制优化方法，以提升建筑能源系统的经济性、稳定性与环保性。研究结果表明，本文提出的创新方法与平台能够显著提升建筑负荷预测精度，优化光伏－储能系统运行效率，有效降低建筑运行成本与碳排放，为实现“双碳”目标下的建筑绿色低碳转型提供了重要的理论依据与实践路径。

关 键 词： 双碳目标；数字建筑；能源管控平台；负荷预测

Innovation of Digital Building Energy Management and Control Platform Under the "Dual Carbon" Goals: Collaborative Control Optimization of Photovoltaic-Energy Storage-Microgrid Based on Load Forecasting Algorithm

Huo Li

Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co.,Ltd. Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract： This paper focuses on the innovation of digital building energy management and control platforms, with a particular emphasis on the collaborative control optimization of photovoltaic-energy storage-microgrid systems based on load forecasting algorithms. The study proposes a method for optimizing the collaborative control of photovoltaic-energy storage-microgrid systems using load forecasting algorithms, aiming to enhance the economic efficiency, stability, and environmental friendliness of building energy systems. The research findings indicate that the innovative method and platform proposed in this paper can significantly improve the accuracy of building load forecasting, optimize the operational efficiency of photovoltaic-energy storage systems, and effectively reduce building operational costs and carbon emissions. This provides a crucial theoretical foundation and practical pathway for achieving the green and low-carbon transformation of buildings under the "Dual Carbon" goals.

Keywords： "Dual Carbon" goals; digital building; energy management and control platform; load forecasting

引言

可再生能源固有的间歇性、波动性和随机性，与建筑负荷需求的动态性、不确定性之间形成了尖锐的矛盾。这种“源－荷”双侧的不匹配，若缺乏有效的协调管控，不仅会降低能源利用效率、增加对电网的冲击，还可能造成能源浪费，甚至影响系统的安全稳定运行。为弥补现有研究的不足，本文立足于“双碳”战略目标，聚焦数字建筑能源管控平台的创新性研究，旨在构建一套从精准预测到协同优化的闭环解决方案。研究不仅有望在理论上丰富建筑能源优化控制的方法体系，更在实践中为推动建筑领域的绿色低碳转型、助力“双碳”目标的实现提供有力的技术支撑和可行的解决方案。

一、基于负荷预测算法的建筑用能需求分析

（一）建筑负荷特性分析与影响因素识别

建筑领域节能的关键，在于对公共建筑的能耗控制。公共建筑的能耗量在我国建筑能耗中占比最高。数据显示，截止2014年

我国公共建筑面积约100亿平方米，能耗高达3.26亿tce，约占总建筑能耗的40%^[1]。建筑负荷是建筑运行中的能源需求总量，具有显著的时空动态性，其特性分析与影响因素识别是预测模型构建的基础。在时间维度上，负荷随日内、周内及季节周期波动，与建筑使用规律、工作日与非工作日差异及气候条件密切相关；在

空间维度上，负荷因建筑功能、结构布局、朝向及围护结构保温性能呈现差异化分布；在类型维度上，办公、住宅、商场、工业等不同功能建筑的负荷基准值、波动幅度及核心来源差异显著，与使用场景和生产排程紧密相关^[9]。建筑负荷受外部环境、内部使用及建筑本身三类因素共同作用，外部环境以气象条件为主，多为不可控；内部使用涉及人员活动、用能习惯及设备运行，多为可控或半可控；建筑本身则为固定属性，包括面积、物理参数及功能布局，是负荷形成的基础。通过多维度特性与影响因素的综合分析，可为建筑负荷预测与能源优化提供科学依据。

（二）负荷预测数据预处理与特征工程

负荷预测精度依赖数据质量与特征有效性，需通过数据预处理解决数据质量问题，借助特征工程构建有效输入特征，避免垃圾数据致模型误判、无效特征增模型复杂度^[9]。数据预处理是将原始数据转化为干净数据的过程，先进行数据采集与整合，明确来源与时间粒度，确保预测粒度与数据粒度匹配；再处理缺失值，依据缺失率分别采用插值、模型预测、删除或补充数据等方式；检测并处理异常值，同时通过归一化或标准化消除特征量纲差异^[4]。特征工程分两步，是提升预测精度的关键，一是特征构造，基于原始数据构建有意义的新特征，包括捕捉周期性的时间特征、增强解释力的气象衍生特征、反映历史趋势的负荷衍生特征，以及融合多因素的交叉特征；二是特征筛选，剔除冗余与弱相关特征，通过相关性分析、方差分析、模型嵌入筛选等方式，保留与负荷强相关、对模型有价值的特征，降低模型复杂度。

（三）一种融合多源信息的建筑负荷预测模型构建

传统单一模型因难充分利用多源信息致预测精度受限，时序模型 + 机器学习模型混合架构通过分解负荷、多模型拟合再融合，实现多源信息互补，提升复杂场景预测能力^[6]。其核心思路是将建筑负荷拆分为趋势项、周期项、随机项，分别用 XGBoost、LSTM 拟合，再经误差修正模块优化随机项。该模型采用三层架构，第一层为数据输入与特征分配，将预处理后的时序特征分配给 LSTM，非时序特征分配给 XGBoost，避免信息混淆；第二层为子模型训练与局部预测，LSTM 捕捉时序依赖输出周期项预测值，XGBoost 处理高维非时序特征、捕捉非线性关系输出趋势项预测值；第三层为结果融合与误差修正，通过加权融合结合两子模型输出，再用误差预测模型修正偏差，得到最终预测值^[9]。模型训练与参数优化中，数据集按时间序列划分避免数据泄露；用网格搜索或贝叶斯优化调整 LSTM、XGBoost 关键参数；训练时 LSTM 采用早停策略防过拟合，XGBoost 用交叉验证提升泛化能力。

（四）预测模型性能评估与结果分析

模型性能评估需从定量指标、定性分析与误差归因三方面展开，综合判断模型精度并指导优化^[7]。定量指标包括平均绝对误差、均方根误差和平均绝对百分比误差，分别从平均偏差、大偏差敏感性和跨场景可比性角度评估模型表现。定性分析通过可视化对比预测与真实负荷曲线，判断模型是否准确捕捉周期性与峰值特征，识别趋势吻合但局部偏差的问题。误差归因则从数据、特征、模型三维度剖析原因，排查数据异常、特征构造不足或模

型结构不匹配等问题，为后续优化提供依据。整体评估需兼顾整体精度、局部偏差与趋势一致性，确保模型鲁棒性与实用性。

二、光伏 - 储能 - 微网协同控制优化策略

（一）协同控制优化目标与约束条件

光伏 - 储能 - 微网协同控制的核心在于构建“目标 - 约束”体系，即在保障系统安全运行的前提下，通过平衡经济性、稳定性与环保性三大目标，满足物理、运行与政策等多重约束，实现综合效益最优^[9]。经济性目标以最小化系统运行成本为核心，通过光伏优先消纳、储能错峰充放电降低购电成本，优化设备运行工况减少运维成本，并利用储能与负荷调节提高光伏消纳率，减少弃光损失。稳定性目标聚焦于维持微网电压与频率的稳定，通过储能快速响应平抑光伏出力波动，并在负荷突变或电网扰动时及时补能，确保电能质量在安全范围内。环保性目标则致力于最大化清洁能源就地消纳，降低对化石能源的依赖，减少碳排放^[9]。同时协同控制必须严格遵守各类约束条件，物理约束基于设备特性，如光伏出力上限、储能充放电功率与荷电状态安全区间、线路变压器容量限制；运行约束保障系统协同与供电可靠，如满足电网调度要求、确保重要负荷不间断供电；政策约束则需符合并网技术标准、电力市场规则及能源监管规定。

（二）基于负荷预测的“源 - 网 - 荷 - 储”协同控制架构

基于建筑负荷预测结果构建的“源 - 网 - 荷 - 储”协同控制架构，采用分层控制 + 集中决策模式，以负荷预测为基础、集中决策为核心、分布式执行为支撑，通过感知层、决策层、执行层的协同配合，实现各环节信息交互与动态联动，解决光伏出力随机性与负荷波动性的匹配问题，形成数据采集 - 策略制定 - 指令执行 - 状态反馈的闭环控制^[10]。感知层作为通过传感器、智能仪表等采集关键数据；决策层作为以中央控制器为核心，结合感知层数据与负荷预测结果，通过多目标优化模型，制定光伏出力分配、储能充放电、负荷调节及微网 - 电网交互功率等策略，并具备动态修正能力，在负荷或光伏出力偏差超限时快速重算指令，保障供需平衡；执行层由光伏逆变器、储能 PCS、智能负荷控制器等设备组成，将决策指令转化为具体动作，同时将设备运行状态实时反馈至感知层，确保指令准确执行。

三、数字建筑能源管控平台设计与实现

（一）平台总体架构设计

数字建筑能源管控平台采用分层解耦、协同联动的设计思路，构建感知层 - 传输层 - 平台层 - 应用层四层架构，各层级功能独立且相互衔接，满足不同规模建筑的能源管控需求。感知层作为数据源头，通过部署光伏逆变器、储能监测传感器、智能电表、负荷监测传感器及环境感知设备，实时采集“源 - 网 - 荷 - 储”全环节运行状态与环境参数，具备低功耗、高可靠性及动态调整采集频率的能力。传输层采用有线 + 无线混合方式，将感知层数据安全稳定传输至平台层，支持数据预处理、格式转换

与加密传输，确保数据实时性与安全性。平台层采用云-边协同架构，边缘节点实现本地实时处理与快速响应，云端负责海量数据存储、大数据分析 with 多建筑协同优化，内置负荷预测、能源调度及故障诊断等核心算法，为上层提供决策支持。应用层面向不同用户角色，提供 Web 端与移动端结合的可视化功能，支持大屏监控、报表分析、告警推送及个性化模块配置，如商业综合体的能耗计量或工业园区的光储协同控制，确保平台应用贴合实际需求。

（二）平台核心功能模块实现

数字建筑能源管控平台围绕数据管理、监测监控、优化控制、运维管理和决策支持五大核心需求构建，形成完整能源管控闭环，切实解决建筑能源管理中的实际问题。数据管理模块作为平台基础，负责能源数据的全生命周期管理，通过 Modbus、BACnet 等协议自动采集能耗、设备状态及环境数据，支持手动录入运维记录与电价政策，采用多维度校验规则进行数据清洗，结合时序数据库与关系型数据库实现高效存储与共享，确保数据准确性、完整性与可用性。监测监控模块通过可视化界面实时展示建筑能源系统运行状态，以三维模型叠加能源流、关键指标及分区能耗，动态监控设备运行参数，超阈值自动告警并记录，帮助管理人员直观掌握系统运行情况。优化控制模块基于负荷预测与协同调度策略，通过粒子群算法生成最优控制方案，自动下发指令至光伏、储能、空调等设备，实时监测执行效果并动态修正偏差，实现能源系统的经济、环保、稳定运行。运维管理模块通过设备台账记录全生命周期信息，结合算法诊断潜在故障，自动生成运维任务并跟踪执行，统计分析故障率与维护成本，优化运维策略，提升设备可靠性。决策支持模块通过能耗统计、节能潜力评估、碳排放核算等功能，结合行业基准与模拟分析，自动生成节能改造方案与决策建议。

（三）平台关键技术选型与部署

数字建筑能源管控平台的稳定运行与功能实现，依赖于合理的技术选型与科学的部署方案，需综合考虑性能需求、场景特点和成本预算，确保平台具备高可靠性、可扩展性和安全性。技术选型涵盖硬件与软件两方面，硬件包括感知层的智能计量设备、传感器和执行设备，传输层的工业级交换机、无线网关等，平台层则采用时序数据库与关系型数据库组合，结合边缘计算与云端计算框架；软件方面集成开源算法库与前端可视化框架，支持负荷预测、故障诊断与实时监控。部署模式分为私有云、公有云和混合云，分别适用于高安全需求、中小规模和大型复杂场景，实施过程需经过规划、部署、测试、上线和运维全流程管理，确保平台有序上线与长期稳定运行。安全保障方面，从数据加密、权限控制、网络分区、防火墙部署到应用安全认证，构建全方位防护体系，防止数据泄露与系统攻击，保障平台整体安全可靠。

四、结束语

本文围绕“双碳”目标下建筑能源系统的智能化转型需求，聚焦于数字建筑能源管控平台的创新性研究，系统性地探讨了如何通过先进的负荷预测算法与协同控制优化策略，提升建筑光伏-储能-微网系统的运行效能。研究通过理论创新与工程实践相结合，不仅显著提升了建筑负荷预测的精度和能源系统运行的经济性与环保性，也为“双碳”目标下的建筑绿色低碳转型提供了兼具理论价值与实践意义的解决方案。未来研究可进一步探索在数据稀疏场景下的模型迁移学习能力，引入随机优化或模型预测控制等更先进的控制理论以应对系统不确定性，并将平台功能拓展至建筑群、园区乃至城市级的区域能源互联网，探索与需求响应、虚拟电厂及碳交易等新兴市场机制的融合。

参考文献

[1] 张军. 公共建筑能耗监测系统及能耗数据挖掘方法的研究 [D]. 陕西：长安大学, 2017.

[2] 包胜, 陈超, 楼笑笑, 等. 基于 BIM 的建筑能耗分析 [J]. 科技通报, 2024, 40(1): 49-54. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2024.01.008.

[3] 曹瑞, 张晓兰. 建筑能耗影响因素及节能优化设计研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7(5): 29-31.

[4] 胡真齐, 赵何超, 张茂强, 等. 基于 IAFSA-LSSVR 的办公建筑能耗预测模型 [J]. 制冷与空调, 2025, 25(7): 8-15. DOI: 10.20245/j.issn.1009-8402.2025.07.002.

[5] 蒲靖, 刘婉莹, 祁照鹏, 等. 基于 BIM+CIM 数据集成的建筑能耗管理应用 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2025, 17(1): 43-49. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2025.01.08.

[6] 陈龙, 李明月. 基于 BIM 的建筑能耗模拟与优化策略研究 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2025, 43(2): 146-149. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1402.2025.02.039.

[7] 要陶然, 陈奕帆, 祝晨阳, 等. 基于 Python 的建筑能耗回归模型与可视化系统 [J]. 科技与创新, 2025(13): 122-125. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2025.13.033.

[8] 黄险峰. 建筑能耗模拟策略 [J]. 广西城镇建设, 2007(3): 63-65. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7045.2007.03.026.

[9] 张进, 方海燕, 马雪源. 基于 BIM 技术的绿色建筑能耗模拟方法设计 [J]. 石材, 2025(6): 174-176.

[10] 马文韬, 刘兴成. 基于 Transformer 神经网络的建筑能耗预测模型 [J]. 建筑节能 (中英文), 2024, 52(10): 114-121. DOI: 10.3969/j.issn.2096-9422.2024.10.016.