

基于深度学习的建筑室内环境智能调控方法研究

文 | 王燕

传统建筑室内环境调控方法在施工扬尘治理、有害气体监测及竣工调试等工程实践中，受制于物理模型精度不足与多参数非线性耦合等局限，难以满足复杂施工场景的调控需求。深度学习技术结合数字孪生与 BIM 技术，为建筑全生命周期室内环境智能调控提供了完整的技术路径，对推进绿色建筑节能与“双碳”目标实现具有重要工程意义。



(配图由 AI 生成)

建筑室内环境多源异构数据感知与特征表征体系

建筑室内环境在施工、交付及运维各阶段均涉及温度、湿度、CO₂ 浓度、照度与噪声等多维物理参数的协同管控，依据 GB/T 50785《民用建筑室内热湿环境评价标准》等规范要求，各参数须满足相应工程指标，但其动态演变受室外气候扰动、施工作业行为及机电设备运行状态的共同影响，管控难度较大。依托物联网传感器网络在施工现场的规模化布设，多源异构数据的实时采集成为可能，但施工环境振动干扰、设备采样频率差异及数据缺失等工程现场特有问题的数据质量构成严峻挑战。为此，需结合建筑工程实际场景，构建涵盖多模态数据融合、异常检测与缺失值修复的预处理流程，并借助深度自编码器和注意力机制对高维数据进行压缩与特征提取，形成适配深度学习模型的高质量特征表征体系，为后续调控模型的精准训练奠定基础。

深度学习驱动的室内环境智能调控模型研究

室内环境动态演变的深度时序建模与预测方法

1. 多尺度时序特征提取与环境参数周期性建模

大型商业建筑、医院洁净室及地下工程等典型场景中，室内环境参数的动态演变兼具分钟级短期突变与月度长期漂移相互叠加的多尺度特性，依据 GB 50189《公共建筑节能设计标准》，各参数须满足相应工程指标，单一时间粒度的特征提取难以全面支撑合规管控需求。卷积神经网络（CNN）可高效捕获施工扰动或人员聚集引发的环境参数短时突变，长短时记忆网络（LSTM）保留跨时间步的长程依赖信息，二者的级联融合架构实现了多尺度时序特征的协同提取。针对温湿度、CO₂ 浓度等参数固有的日周期与周周期规律，引入傅里叶位置编码将时间周期信息嵌入模型，增强其对日夜交替、作息规律等周期性环境波动的拟合精度，构建适应多场

景动态特性的高鲁棒性时序特征提取框架。

2. 基于 Transformer-LSTM 混合架构的多步超前预测模型

办公楼、医院等建筑的室内环境调控前瞻性决策，依赖于对未来多时间步环境状态的准确预判，以满足 GB/T 50785《民用建筑室内热湿环境评价标准》对热湿环境的合规要求。Transformer 架构的多头自注意力机制能够同时关注历史序列中多个关键时间节点的环境状态，自适应提取对当前预测最具影响力的时间窗口信息，有效规避传统循环网络在处理长时间跨度数据时，信息逐级衰减、远期规律难以捕获的固有缺陷。将 Transformer 编码器提取的全局上下文表征与 LSTM 保留的局部时序状态向量深度融合，构建编解码式多步预测框架，支持对温度、湿度、照度及 CO₂ 浓度等多环境参数的联合超前预测。结合滑动窗口训练策略，模型在不同预测步长下均能维持稳定精度，为调控指令的提前介入提供可靠支撑。

3. 数据驱动预测模型的不确定性量化与置信度评估

深度时序预测模型在地下工程、洁净室等复杂工程场景的实际部署中，不可避免地面临传感器噪声、施工扰动引发的现场实际数据统计规律偏离训练分布的漂移现象，以及模型在新场景下预测精度下降等多源不确定性，单点预测输出难以反映预测结果的工程可信程度。贝叶斯深度学习框架通过多次随机屏蔽部分神经元并重复预测，以统计方式估计预测结果的不确定范围，输出涵盖均值预测与置信区间的概率性预测结果。集成学习策略通过融合多个差异化子模型的预测分布，进一步提升不确定性估计的可靠性，当环境参数预测不确定性超过设定阈值时，系统自动触发保守调控模式，有效规避因预测偏差导致的工程调控失稳风险。

面向多目标协同优化的深度强化学习调控策略

建筑室内环境调控在施工与运维阶段均涉及热舒适度、

空气质量、照明品质与系统能耗之间的动态权衡，须同步满足绿色建筑评价标准对室内环境质量的相关条款要求。深度强化学习（DRL）无须精确的物理模型，即可自主学习最优调控策略，采用多智能体强化学习（MARL）框架，将暖通空调、照明与新风系统分别建模为独立决策智能体，通过集中训练、分散执行的协作机制实现多子系统协同优化。奖励函数综合考量舒适度指标（PMV、PPD）、能耗惩罚项与设备动作频次约束，引导策略收敛至在不损害任一优化目标前提下各目标整体最优的均衡方案集合，为大型商业建筑及园区级能源管理提供多目标优化支撑。

复杂建筑场景下调控模型的自适应泛化与可解释机制

深度学习调控模型在办公楼等特定场景下训练所得的策略，往往面临在医院洁净室、地下工程等跨建筑类型或跨气候区域工程部署时性能显著衰退的泛化瓶颈。通过将已有场景积累的模型知识复用至新场景的迁移学习，以及赋予模型快速适应新任务能力的元学习机制，使预训练模型仅需少量新场景样本即可完成快速适应，大幅降低新工程场景的冷启动代价。域自适应技术通过对齐源域与目标域的特征分布，进一步缩小不同建筑类型差异对模型泛化能力的负面影响。基于量化各输入参数对模型决策贡献程度的 SHAP 值分解与直观呈现模型重点关注区域的显著性图分析所构建的可解释性框架，能够将模型调控决策映射至具体物理参数的贡献权重，为工程师的人工校验与合规审查提供可溯源的决策依据。

数字孪生与 BIM 技术赋能的智能调控系统集成与验证

建筑数字孪生平台的架构设计与虚实空间映射机制

建筑数字孪生平台以物理建筑空间的高保真数字镜像为核心，依托 BIM 正向设计向施工模拟、运维调控延伸的全生命周期链条，通过多层次架构设计实现物理实体与虚拟模型之间的实时双向数据流通。平台架构自下而上涵盖感知接入层、数据中台层、孪生建模层与应用服务层，各层级间通过标准化数据接口与占用带宽少、传输响应快的轻量级通信协议实现低延迟耦合。在虚实空间映射机制方面，基于 BIM 模型与点云扫描数据构建建筑几何拓扑底座，融合施工现场及运维阶段实时传感数据，驱动室内环境参数的动态状态更新，支持施工图审查与竣工验收中环境参数的合规性可视化验证。运维人员得以在虚拟空间中直观感知室内环境分布态势，并对调控指令进行预演与干预，显著提升建筑环境管理的实时响应能力与决策透明度。

基于数字孪生的调控策略仿真训练与实际系统部署

数字孪生平台为深度强化学习调控策略提供了高保真、低风险的虚拟训练环境，有效规避了策略探索阶段在真实建筑系统中引发能耗异常或设备损耗的工程风险。在仿真训练

阶段，孪生体依据真实建筑的热力学参数、机电设备响应特性与施工作业行为规律构建高精度仿真模型，智能体在孪生环境中通过大规模并行交互完成策略的快速收敛，同步验证调控策略对 GB 50189 等节能标准的合规性。训练完毕的调控策略经由孪生体与物理系统的映射通道逐步迁移部署，采用新策略在后台静默运行、与现有系统并行输出，但暂不实际执行的影子模式机制，对策略输出与现有系统指令进行同步比对验证，确保部署过程的平稳过渡。在线部署阶段，孪生体持续接收物理系统的实时反馈数据，驱动调控模型的增量更新与自适应迭代，实现策略性能的持续在线优化。

智能调控系统的综合性能评估与工程应用前景分析

智能调控系统的性能评估需构建涵盖能效、舒适度与系统响应能力的多维指标体系，并与绿色建筑评价标准中室内环境质量相关条款形成对标。能效维度采用反映单位建筑面积全年综合能耗水平的建筑能耗强度、衡量设备在整个制冷或供热季节综合运行效率的季节能效比以及峰值负荷削减率等量化指标；舒适度维度引入预测平均投票值（PMV）、预测不满意百分比（PPD）及空气质量综合指数（IAQ）进行综合评价；系统响应维度则以调控指令执行延迟、扰动抑制速度与稳态偏差作为核心考量参数。通过与传统 PID 控制、规则基控制及标准 MPC 方法的横向对比实验，验证深度学习调控策略的综合性能优势。随着边缘计算算力提升与建筑 IoT 基础设施完善，智能调控系统具备向大规模商业建筑、医院及园区级能源管理平台推广延伸的广阔应用空间。

结束语

深度学习驱动的建筑室内环境智能调控，实现了从施工阶段多源异构数据感知、动态环境建模到运维阶段多目标策略优化的全生命周期技术闭环。数字孪生与 BIM 技术的深度融合，进一步拓展了调控策略在施工图审查、竣工验收及运维管理中的高保真仿真验证与低风险工程部署路径。随着边缘计算、联邦学习与建筑 IoT 基础设施的持续演进，建筑室内环境调控系统将向更高自主性与更优整体能效水平持续迈进，为绿色建筑发展与“双碳”战略目标的实现提供坚实的工程技术支撑。

作者简介：王燕 上海建科工程咨询有限公司山东公司

责任编辑：杨佳宇 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com