

基于房间级热负荷预测的供热系统按需通断控制方法

曹荣祥¹, 孙国鑫^{1,2*}, 徐凯轩¹, 吴林峰³, 虞启辉^{1,2}, 许少峰¹

¹内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头

²内蒙古机电系统智能诊断与控制工程技术研究中心, 内蒙古 包头

³北京大学鄂尔多斯能源研究院, 内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

现有供暖系统多采用传统反馈控制, 响应迟缓且难以适应动态热负荷变化, 其统一调控策略亦忽视了房间级热需求的空间差异性, 导致能源浪费与热舒适度不足。为此, 本文提出一种基于空间分布特性的动态负荷预测与末端控制方法。通过预测建筑整体负荷并分摊至各房间, 结合区域热惯性差异对末端单元进行分类, 并采用启停补偿策略优化阀门时序, 实现精准按需供热。实验表明, 预测模型平均误差较低, NMBE与CVRMSE指标均符合标准要求, 房间平均温度稳定于18°C, 验证了该方法在提升系统能效与热舒适性方面的有效性。

关键词

按需供暖, 房间级预测, 通断控制, 热负荷分摊, 建筑节能

Adaptive Switching Control in District Heating Systems Enabled by Room-Level Thermal Load Forecasting

Rongxiang Cao¹, Guoxin Sun^{1,2*}, Kaixuan Xu¹, Linfeng Wu³, Qihui Yu^{1,2}, Shaofeng Xu¹

¹School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

²Engineering Technology Research Center for Intelligent Diagnosis and Control of Mechanical Systems in Inner Mongolia, Baotou Inner Mongolia

³Ordos Research Institute of Energy, Peking University, Ordos Inner Mongolia

*通讯作者。

文章引用: 曹荣祥, 孙国鑫, 徐凯轩, 吴林峰, 虞启辉, 许少峰. 基于房间级热负荷预测的供热系统按需通断控制方法[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 323-339. DOI: 10.12677/hjce.2026.155142

Abstract

Conventional heating systems predominantly rely on traditional feedback control mechanisms, which exhibit delayed responses and struggle to adapt to dynamic thermal load fluctuations. Their uniform control strategies also fail to account for spatial variations in room-level heating demands, resulting in energy inefficiencies and suboptimal thermal comfort. To address these limitations, this paper introduces a dynamic load forecasting and terminal control method based on spatial distribution characteristics. By predicting the building's overall thermal load and distributing it among individual rooms, and further classifying terminal units according to zonal thermal inertia differences, the approach employs on-off compensation strategies to optimize valve operation sequences. This enables precise, on-demand heat supply. Experimental results demonstrate that the forecasting model achieves a low mean error, with both NMBE and CVRMSE indices conforming to standard requirements. The average room temperature remains stable at 18°C, validating the effectiveness of the proposed method in enhancing both energy efficiency and thermal comfort.

Keywords

Demand-Driven Heating, Room-Level Forecasting, Switching Control, Thermal Load Allocation, Building Energy Efficiency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现有集中供暖系统存在明显局限：统一的温度控制无法适应房间级热需求的时空异质性[1]，导致能源效率低下和热舒适度失衡[2]，而静态控制策略难以应对动态环境变化。相比之下，模型预测控制(MPC)等先进策略虽能通过滚动优化提升能效，Håkansson 等[3]分析了热价结构对负荷曲线的影响；Quaggiotto 等[4]将 MPC 与混合整数优化相结合，利用热惯性实现 5.8%~20%的成本降低，但其在线求解优化问题对控制器算力要求高、依赖精确物理模型导致实现成本高，且在高随机性用户行为场景下鲁棒性受限。本文提出一种融合空间分布特性的动态负荷预测[5]-[9]与末端控制方法[10]-[12]，通过整体建筑热负荷预测结合热负荷分摊矩阵，实现无需附加硬件的房间级预测。

该方法引入热惯性时间常数[13]量化区域热响应特性，并采用基于热惯性的通断逻辑与启停补偿策略，实现精准按需控制。与 MPC 相比，本方法避免了在线优化求解，计算复杂度显著降低；无需精确物理建模，仅依赖数据驱动预测，实现成本更低；通断调节模式天然兼容既有末端硬件，更适用于用户行为不确定的实际供热场景。仿真验证控制结果表明，所提方法在保证热舒适度的同时有效提升能效，为既有建筑改造提供了计算高效、经济可行的软件级解决方案。

2. 研究方法

通过能源模拟软件获取用户热负荷数据，建立基于建筑特性的负荷分配规则并构建分配矩阵。将建筑特征与气象参数输入预测模型，生成整体建筑热负荷，进而通过分配矩阵解算至各房间。在此基础上，

引入热惯性时间常数表征区域热特性差异,设计末端阀门启停补偿策略,实现按需精准调控。该方法在保障热舒适性的同时显著提升系统能效,为既有建筑节能改造提供了经济可行的解决方案。研究路线图如图1所示。

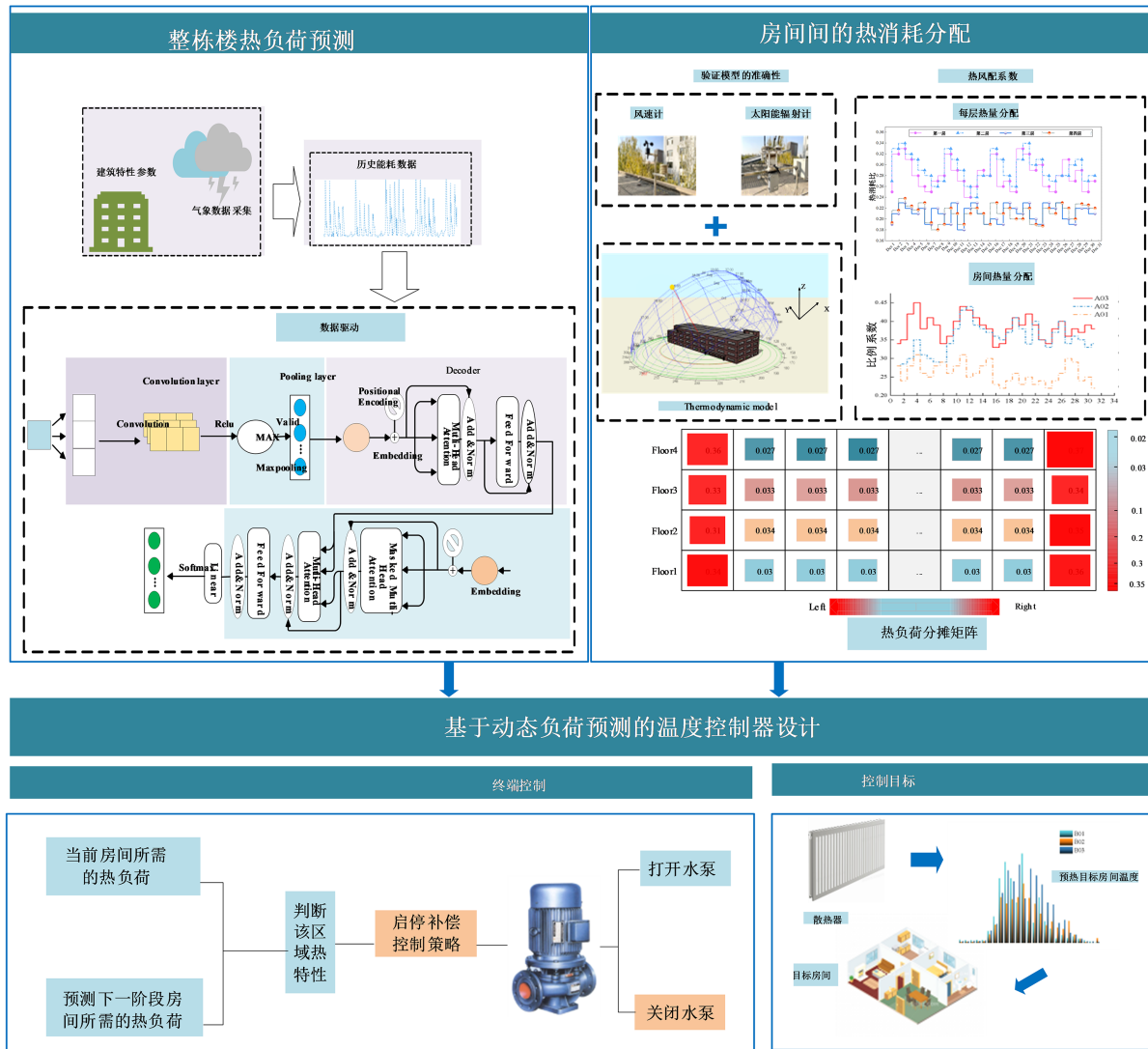


Figure 1. Overall technical route of room-level heat load prediction and terminal control

图1. 房间级热负荷预测与末端控制总体技术路线

2.1. 基于“整体建筑预测 + 区域分布特性分解”的房间级热负荷预测

根据历史数据和实时数据,构建整体建筑的动态热负荷预测模型(CNN-Transformer),结合热负荷分摊矩阵,预测未来一段时间内末端各房间的热负荷数据,预测结果包括每小时的热负荷需求,为后续温度调节阀通断提供依据。

2.1.1. 基于数据驱动的整体建筑负荷预测

为监测外部气象条件,建筑顶部安装了风速、湿度及太阳辐射传感器。建筑内部则战略布局多组温湿度传感器与热量计,实时采集不同区域热环境参数,采样频率为每小时一次。采集数据经预处理后传

输至服务器，用于构建热力学模型并进行标准化与特征提取。

通过相关性分析，确定以室外干球温度、风速、气温和太阳辐射强度作为输入变量，各房间估计热负荷为输出变量。本研究构建了 CNN-Transformer 混合模型：CNN 负责提取建筑物结构与空间热负荷分布特征，Transformer 则通过多头自注意力机制捕捉气象条件、材料特性与热负荷间的长期时序依赖。历史数据训练与评估表明，该混合模型在预测精度与计算效率上均优于传统深度学习方法。模型结构如图 2 所示。

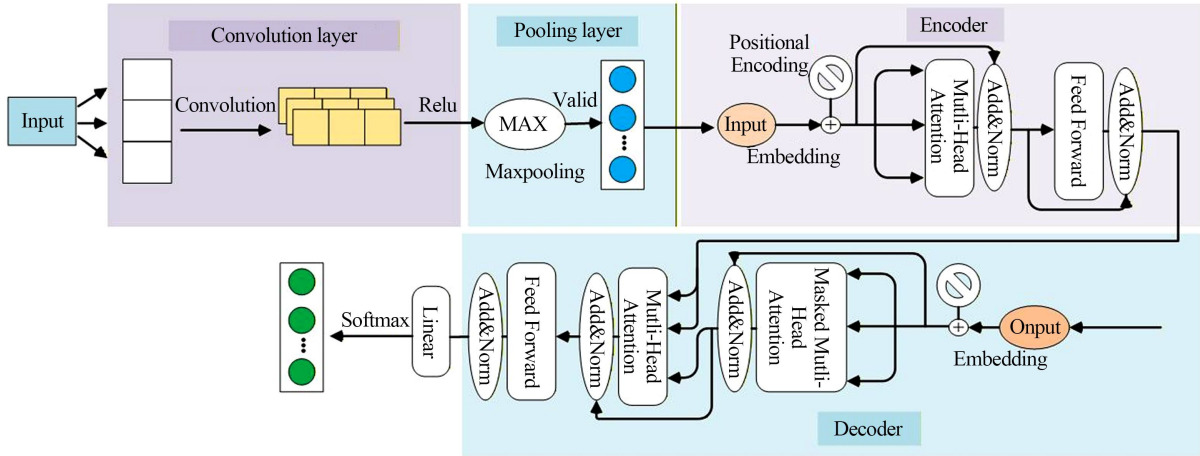


Figure 2. Hybrid model diagram
图 2. 混合模型图

2.1.2. 构建热负荷分配权重

本研究通过软件模拟分析房间热负荷的分配规律。通过使用 DesignBuilder [14]能源模拟软件，我们获得了整栋建筑的综合热负荷数据。此外，我们还计算了各楼层的热负荷权重系数。如公式(1)所示，每层楼的热负荷由相应系数与整栋建筑的总热负荷相乘得到。进而得到该层楼的权重系数如公式(2)：

$$\widetilde{Q}_F^i = \widetilde{Q}_B \cdot \overline{W}_f^i \tag{1}$$

$$\overline{W}_f^i = \frac{\int_0^T \widehat{Q}_f^i dt}{\int_0^T \widehat{Q}_B dt} \tag{2}$$

根据建筑内不同位置的供热特性，我们将所有端部房间划分为左、中、右三个区域。如公式(3)所示，每个区域的热负荷由分摊系数 K_z 与该楼层的热负荷相乘计算得出。分摊系数矩阵为一个 3×4 矩阵，如公式(4)所示，其中跟 Z 跟表示左、中、右三种情况之一。该矩阵包含与左、中、右区域相对应的三组系数。

$$\widetilde{Q}_R^i = \widetilde{Q}_f^i \cdot K_z \tag{3}$$

$$K = [k_l \quad k_m \quad k_r] = \begin{bmatrix} k_l^1 & k_m^1 & k_r^1 \\ k_l^2 & k_m^2 & k_r^2 \\ k_l^3 & k_m^3 & k_r^3 \\ k_l^4 & k_m^4 & k_r^4 \end{bmatrix} \tag{4}$$

分摊系数 K 由分摊区域的热负荷与当前楼层热负荷的比例决定，如公式(5)所示：

$$k = \frac{Q_z^i}{Q_B^i} \quad (5)$$

由于中间区域具有相同的使用特性和建筑结构，因此将其作为一个整体进行研究。在 $z = \text{middle}$ 的情况下，中间区域内特定房间的热负荷可通过该房间面积与分摊系数的乘积，再除以中间区域总面积进行计算，如公式(6)所示。

$$Q_R^z = \begin{cases} Q_{F,L}^i & \text{if } z = \text{left} \\ Q_{F,R}^i & \text{if } z = \text{right} \\ Q_{F,M}^i \frac{A_z}{A_M} & \text{if } z = \text{middle} \end{cases} \quad (6)$$

针对特定位置和区域，确定相应的热负荷分配比例 k ，并将这些比例填入矩阵的对应位置。热负荷分配矩阵如公式(7)下所示。

$$\Delta = \begin{bmatrix} i_{1,1}^k & i_{1,2}^k & \cdots & i_{1,n}^k \\ i_{2,1}^k & i_{2,2}^k & \cdots & i_{2,n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{n,1}^k & i_{n,2}^k & \cdots & i_{n,n}^k \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后由整体热负荷预测值结合热负荷分摊矩阵得出房间级预测值： $\widetilde{Q}_R^i = \widetilde{Q}_B^i \cdot \Delta$ 。

2.2. 基于房间级热负荷预测的按需通断控制策略

建筑供热系统因旧有设备无法响应动态热负荷变化，导致室温调节滞后、舒适度不足。为此，我们提出基于房间级热负荷预测的差异化调控方案：通过数据驱动算法提前预测末端房间热需求，结合建筑热特性分析，对末端设备实施分时分区通断控制。突破传统供热系统“整体调节、被动响应”的局限，实现按需供热、能效提升与舒适性改善的目标。

2.2.1. 不同区域热特性研究

建筑室内温度变化本质上是热动态平衡的过程，其特性受围护结构热惰性、区域间热传递、末端设备响应延迟等多因素影响。以典型供暖房间为例，当末端通断控制信号触发后，室内温度响应并非瞬时完成，而是呈现明显的滞后性与非线性特征。考虑热惯性的房间温度动态模型可以简化为一个一阶惯性系统：

$$T(t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

其中， $T(t)$ 为 t 时刻房间温度， T_0 为初始温度， T_∞ 为目标温度， τ 为热惯性是按常数。

在末端房间通断控制中，热惯性时间常数可用于优化启停时刻，避免频繁启停带来的不必要能耗。热惯性时间系数 τ 是衡量建筑物或空间响应温度变化的速度。它受到热容量 C 、热传导系数 U 、建筑围护结构(如墙体、窗户)的材料和结构影响。建筑物中不同区域的热惯性时间常数存在显著差异。

$$\tau = \frac{C}{UA} \quad (9)$$

其中， C 为热容量代表空间内的储热能力， $J/^\circ\text{C}$ ； U 为传热系数代表墙体、窗户传导性能， $^\circ\text{C}$ ； A 为与外界换热面积， m^2 。

针对建筑不同区域以及该区域在所在建筑的不同位置热响应都不同。同时不同时段，各区域的温度

需求和负荷特性差异显著, 分时分区控制策略需要根据不同时间段的负荷变化及区域特性, 动态调整末端房间阀门的通断。

根据热惯性的大小, 结合实际情况以及相关文献的参考, 可大致分为以下几类: 低热惯性、中等热惯性、较低热惯性、高热惯性[15]。对于热惯性大的区域, 可延长启停时刻; 对于热惯性小的区域, 则可以缩短启停时刻, 实现更精细化的调控。研究对象建筑按功能划分为仓储区和办公区两大类型, 不同区域的热惯性差异决定了通断控制策略需要差异化调整, 以适应其热响应特性。其中办公区可进一步细分为边缘办公区(建筑外围区域)和中间办公区(建筑核心区域)。各区域呈现显著不同的热力学特性: 边缘办公区靠近建筑物外层, 这些区域的室内温度受外界环境影响较大, 热损失和热增益较为显著。中间办公区则位于建筑物中间区域, 既不直接受外部影响也同时有周围建筑包围, 有较好的保温性能, 结构稳定, 热损失相对较少。根据 ASHRAE Handbook-Fundamentals (2021 版)[16]以及相关文献的经验, 建筑物中不同区域的热惯性时间常数可以如下估算, 如表 1 所示:

Table 1. The thermal inertia time constants of different regions and their typical response characteristics
表 1. 不同区域热惯性时间常数以及其典型相应特征

区域类型	热惯性时间常数 τ	典型热响应特性
轻质办公室	20~40 min	热惯性小, 响应快
边缘办公区	40~60 min	热惯性小, 热损失快, 响应较慢
中间办公区	60~90 min	热惯性适中, 室温变化速度慢
仓储区(大空间)	3~6 h	热惯性大, 响应慢

2.2.2. 不同区域热特性研究

1) 设置死区

死区(deadband)是指在一定温度范围内, 系统不执行通断操作, 以减少频繁启停造成的能耗和设备磨损。合理设置死区可提高控制系统的稳定性。对于该建筑中仓储区温度变化慢, 死区相对可以较大减少频繁启停, 设置 $\Delta T_{\text{warehouse}} \approx 1.5^{\circ}\text{C} \sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 波动快, 死区相对窄, 并且舒适度要求高, 设置 $\Delta T_{\text{office}} \approx 0.5^{\circ}\text{C} \sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 。

2) 设置启停补偿策略

为了克服热惯性对通断设置的影响, 采用启停补偿策略。针对不同区域的热特性, 提前启动时间, 根据热惯性常数 τ 和补偿系数 α 计算, 确保目标时刻达到设定温度。同时, 提前关闭时间结合区域热响应特性, 应用补偿系数 β 进行动态调整, 从而优化能源利用效率, 提升室内舒适度。

仓储区通常热惯性大, 响应慢, 因此需要较大的补偿系数, 由上表热惯性时间常数 $\tau = 3 \sim 6 \text{ h}$, 即温度预测显示需要较长时间才能达到设定温度, 因此需要较长时间提前启动, 由此设置 $1 \sim 2 \text{ h}$ 。同时惯性大、温度变化缓慢, 并考虑其区域功能性, 热系统可以在略有波动后仍保持关闭, 即 $\alpha_{\text{warehouse}} = 0.5$ 、 $\beta_{\text{warehouse}} = 0.2$ 。

边缘办公区因受外墙和天气变化影响, 因此热损失和热增益较为显著, 适中频率的调节, 延迟响应外界气候变化, 热惯性时间常数 τ 设定为 $40 \sim 60 \text{ min}$, α_{office} 、 β_{office} 均设置为 0.5 。中间办公区热惯性适中, 热惯性时间常数 τ 设定为 $60 \sim 90 \text{ min}$, 阀门开启补偿时间设置在 $30 \sim 40 \text{ min}$ 范围内, 即在温度达到预设值前, 系统应提前 $30 \sim 40 \text{ min}$ 启动, $\alpha_{\text{warehouse}} = 0.5$, 考虑中间办公室相对室温变化慢, $\beta_{\text{office}} = 0.3$, 即在达到设定温度前提前关闭, 利用剩余热量维持温度。

则启停时间补偿计算为:

$$t_{\text{om}} = t_{\text{预测}} - \alpha \times \tau \quad (10)$$

$$t_{\text{off}} = t_{\text{预测}} - \beta \times \tau \quad (11)$$

2.2.2. 按需通断控制总体策略

该控制策略主要依据数据驱动的动态负荷预测得到房间级的热负荷预测值，首先，该热负荷预测与所需的热负荷比较判断末端房间的热需求，之后与设置的死区判断是否通断；之后考虑到建筑内部各区域热需求差异，匹配所属区域的热惯性时间常数，进而采取启停补偿策略计算通断开启进而实现按需供热。该控制器工作原理图如图 3 所示。

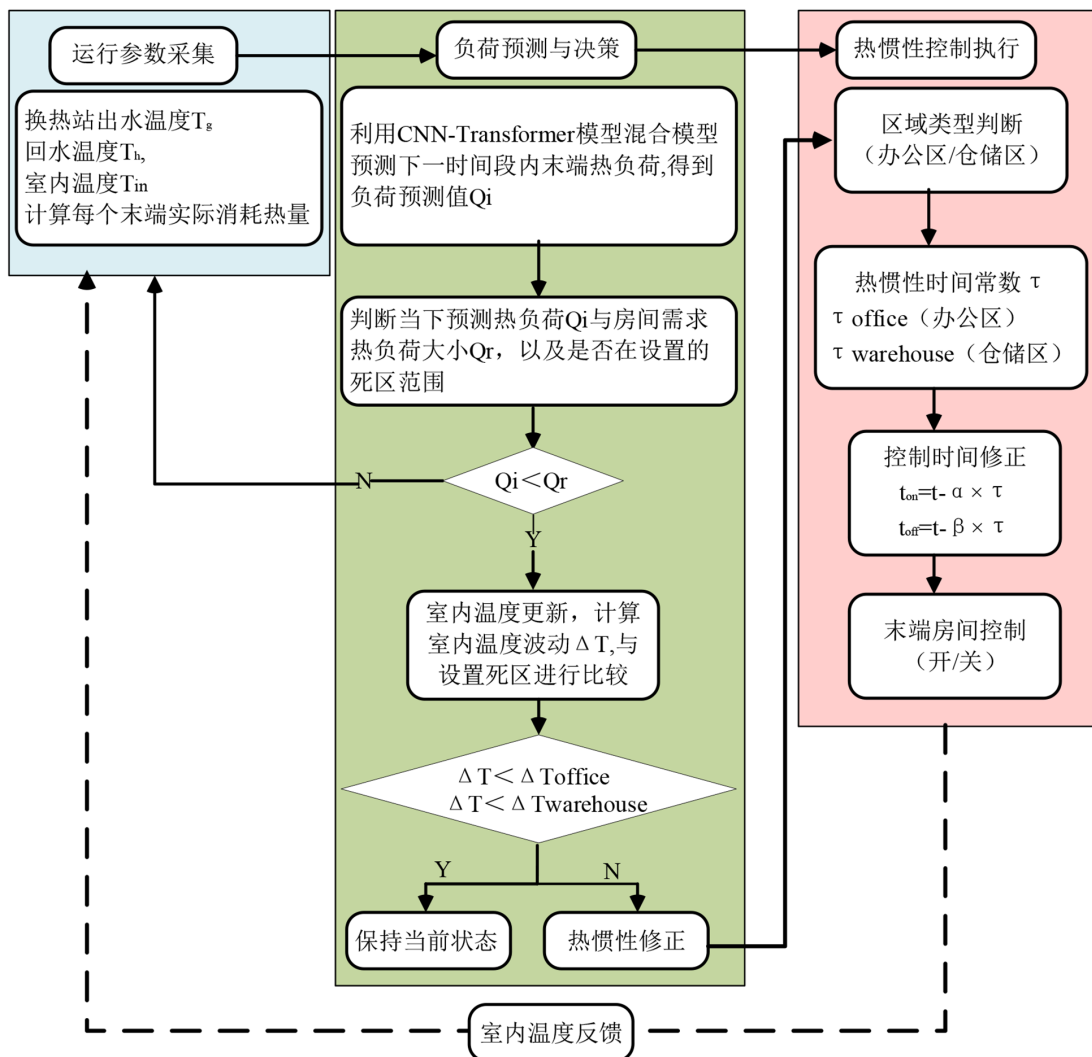


Figure 3. Schematic diagram of terminal controller
图 3. 末端控制器原理图

1) 端房间预测值以及实际数据采集

首先获取换热站以及供水温度 T_g 、回水温度 T_h ，并计算每个末端实际消耗热量，通过各区域末端热量表或传感器，实时房间数据，为后续预测与控制提供依据。

2) 室内温度更新

根据预测负荷及设定的供回水温差，计算换热站的预测供水流量，根据以下公式：

$$\dot{m}_{\text{predicted}} = \frac{Q_p}{\Delta T_{\text{design}} C_p} \quad (12)$$

根据供水流量及供暖效果，更新各区域的室内温度。更新公式为：

$$T_{\text{room}}(t+1) = a \cdot T_{\text{room}}(t) + b \cdot P \cdot (\dot{m}_{\text{predicted}} - T_{\text{room}}(t)) + c \cdot L_{\text{predicted}}(t) \quad (13)$$

其中 a 为温度衰减系数， b 为散热片供暖影响系数， P 为散热片功率状态， c 为外部负荷影响系数， $L_{\text{predicted}}(t)$ 为预测负荷。同时由之前设置的仓储区 $\Delta T_{\text{warehouse}} \approx 1.5^\circ\text{C} \sim 2.5^\circ\text{C}$ ，办公区 $\Delta T_{\text{office}} \approx 0.5^\circ\text{C} \sim 1.0^\circ\text{C}$ 。判断当前房间温度波动 ΔT 是否在所设置区域的波动范围，如果在则不开启，反之。

3) 考虑不同区域热特性的通断控制

根据不同区域的热惯性时间常数，进而计算不同区域的启停时间，以此对末端房间的温度调节。最后传感器反馈当前房间温度，数据信息采集。最后传感器反馈当前房间温度，数据信息采集。

3. 案例分析

3.1. 实验和仿真平台

本研究在位于承担科研项目的北大科技园的太阳能 - 天然气复合供暖系统，采用仿真模拟结果与所提出的算法进行实验验证。在园区 2 号办公楼(109.99749656172014, 40.68295473393258)进行热负荷模拟与验证。该建筑总面积为 1890 平方米，共四层，每层高度为 3.5 米。各层功能区域不同：一层为食品仓储，二层为检测公司，三层为生物医用(稀土)陶瓷材料研究所，四层为教育机构，如图 4 所示。



Figure 4. Research object
图 4. 研究对象

该系统采用太阳能 - 天然气联合供暖方式，太阳能集热总面积为 760 平方米，供热面积为 7210 平方米。在阳光充足时，利用太阳能真空管进行集热；在阴雨天气及夜间，通过天然气联合供暖维持室内温度的稳定。楼顶安装了风速、湿度传感器和全自动太阳辐射追踪仪，配备了两个蓄热水箱，其中一个用于为太阳能系统提供水源，另一个用于储存通过太阳能加热的热水。办公楼还配有太阳能电气柜、热量表及数据采集装置等，采暖与数据收集系统如图 5 所示。

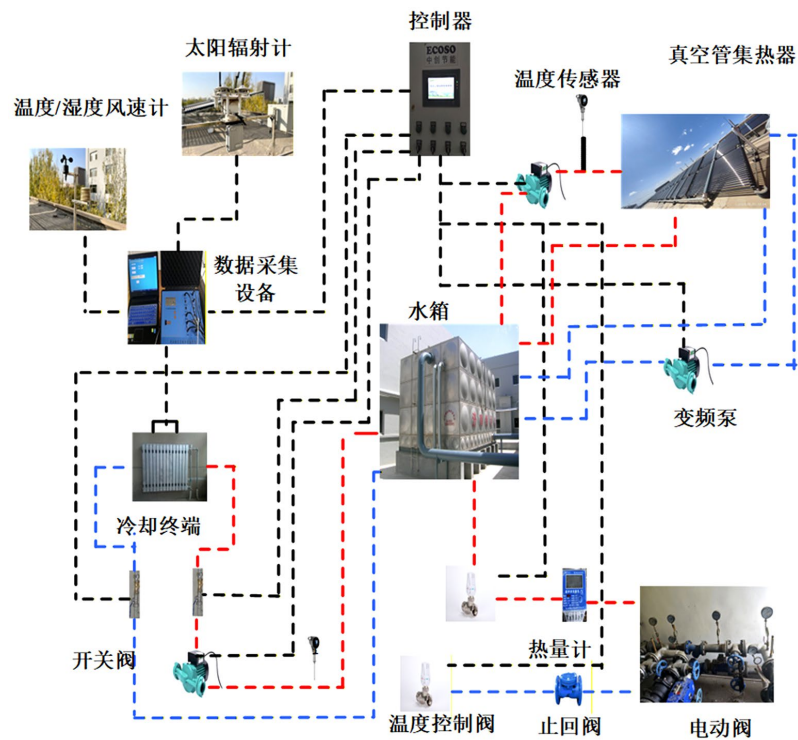


Figure 5. Physical experimental platform
图 5. 物理实验平台

3.1.1. 建筑能耗模拟

建筑热负荷通过 DesignBuild 软件的模拟进行计算，相关的热力学建模数据来源于技术园区的建筑蓝图，并用于热力学建模过程。对大楼的内部分布进行了详细分析，并对每层楼的工作人员进行了系列调查和问卷调查。调查的主要目的是收集：人员数量与分布；估算大楼内同时工作的人员数量，并确定人员的主要集中区域；工作人员的工作时间安排(工作日、周末夜班等)；工作人员的生活习惯，如经常开窗及进出建筑物的频率等。同时建立热力学建筑模型如图 6 所示。

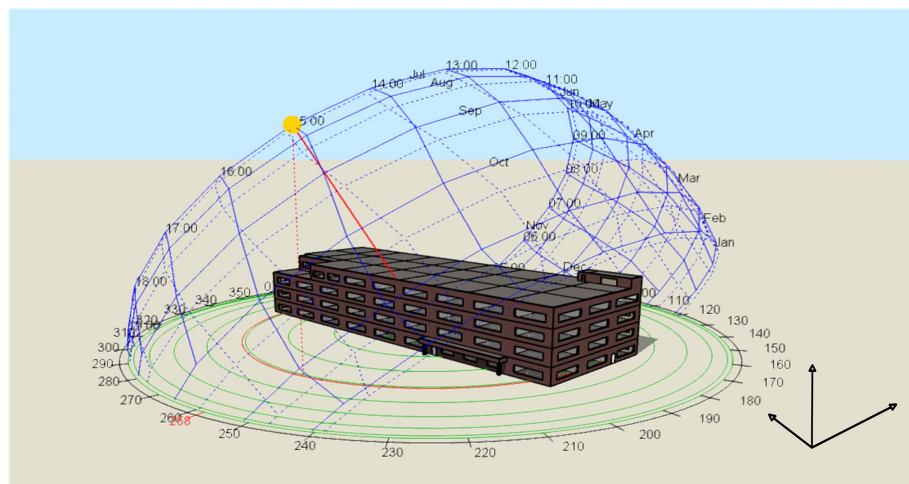


Figure 6. Thermodynamic building model
图 6. 热力学建筑模型

3.1.2. 仿真结果及模型验证

在实际应用中,模型的预测误差对实际指导具有重要影响。为了评估本文提出的热负荷分摊模型的性能,依据 ASHRAE 标准,本文采用了两个评价指标:归一化平均偏差误差(NMBE)和均方根误差变异系数(CVRMSE) [17]下:

$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{actual}} - P_{\text{simulate}})}{P_{\text{actual}}} \times 100\% \quad (14)$$

$$CVRMSE(\%) = \frac{\sqrt{\sum (P_{\text{actual}} - P_{\text{simulate}})^2 / n}}{|P_{\text{Meanobservedvalue}}|} \times 100\% \quad (15)$$

本研究选取了次年 12 月至次年 2 月的气象资料进行分析。整栋建筑及单间热负荷的模拟值与实际值如图 7 所示。NMBE 和 CVRMSE 分别为 4.91%和 4.11%,以及 8.68%和 9.01%。综上所述,两个指标均满足标准误差要求,表明该模型在热负荷分析中的应用是可靠的。

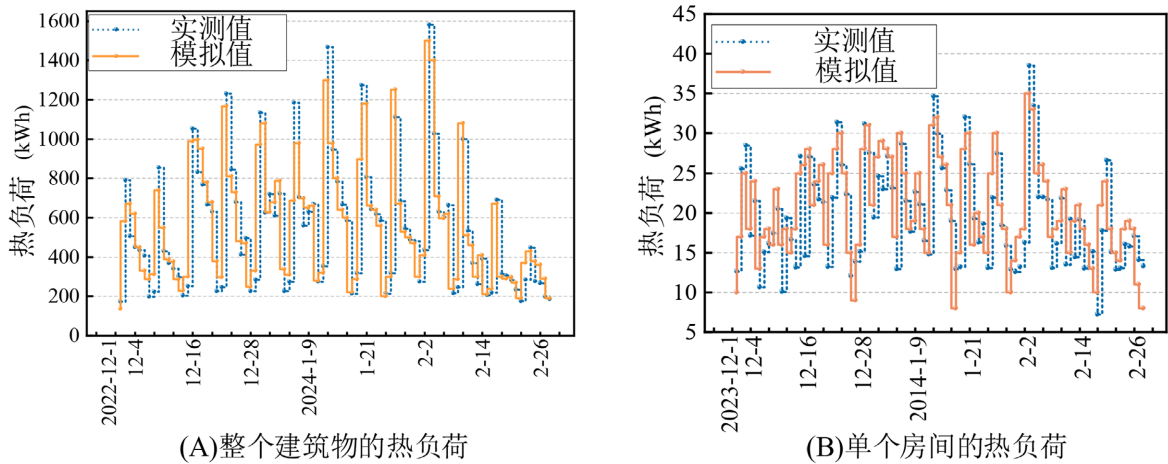


Figure 7. Comparison between actual and simulated values
图 7. 实际值与仿真值对比

3.2. 末端热负荷预测示例研究

3.2.1. 整栋建筑热负荷预测

研究数据来源于工业园区 2 号楼。在 12 月至 1 月期间,共提取了 1488 个数据点用于热负荷预测。根据时间序列方法,初始的 80%(1042 个数据点)被用作训练集,剩余的 20%(296 个数据点)作为测试集。数据被划分为 k 个子集,依次使用每个子集作为验证集,其余部分作为训练集。通过分析不同时期的气象条件,对数据进行了归一化和标准化处理。考虑到数据的不同性质,构建了多个子模型。

其中一个模型处理温度、风速、太阳辐射等变量,另一个模型则考虑这些变量在建筑内的空间分布。预测得到的目标房间一天的热负荷数据如图 8 所示。

热负荷预测采用了 CNN、Transformer 和 CNN-Transformer 方法。预测结果及其平均绝对误差如图 9 所示 6.55%。在预测精度方面,CNN-Transformer 模型分别比 CNN 和 LSTM 模型提高了 5.25%和 7.48%。此外,CNN-Transformer 模型表现出更低的平均相对误差,相比 CNN 降低了 9.32%,相比 Transformer 降低了 11.26%。

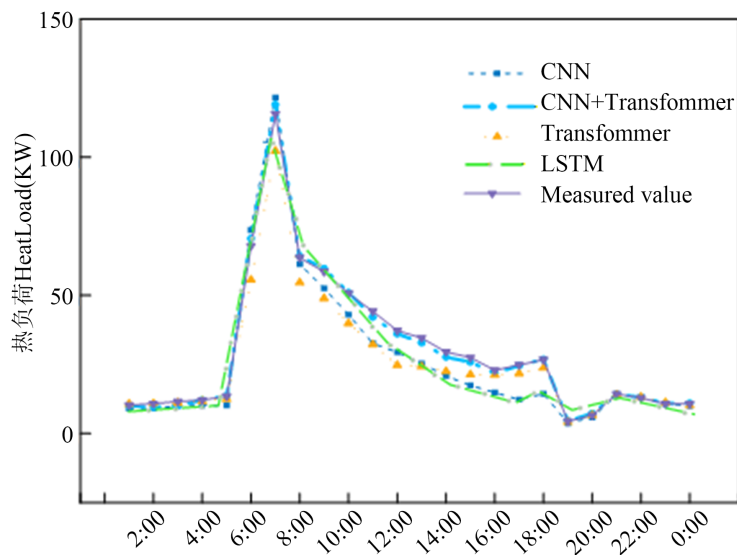


Figure 8. Whole building heat load

图 8. 整栋建筑热负荷

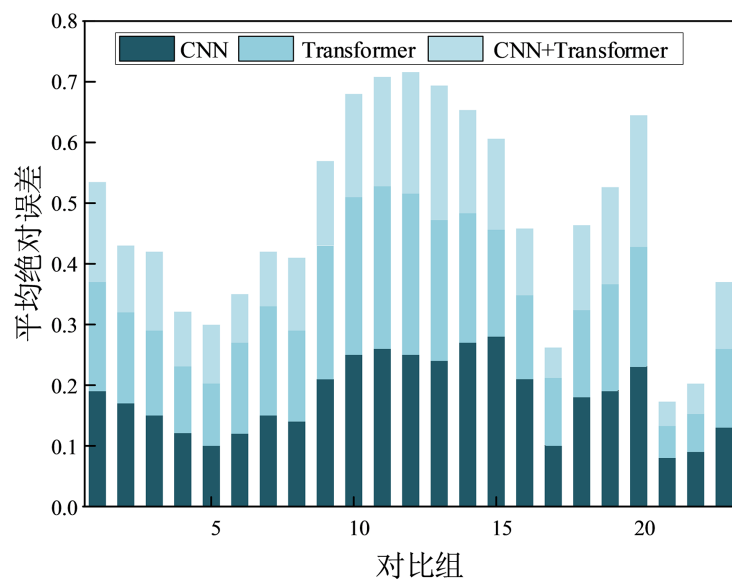


Figure 9. Comparison diagram of prediction results and average error

图 9. 预测结果与平均误差对比图

3.2.2. 建筑耗热分摊矩阵建立

根据所提出的建筑耗热分摊方法，建筑物被划分为两种类型。第一种类型按纵向层级划分：底层区域为 A 类，中间二层为 B 类，第三层区域为 C 类，顶层区域为 D 类。第二种类型按横向位置划分：左侧单元由下到上为 A01、B01、C01、D01，依次为 A02、B02、C02、D02，右侧单元为 A03、B03、C03、D03。该建筑物具体为一层为仓储区，剩余办公区，其中办公区细化为边缘办公区(除中层办公区以外)、中层办公区(B02、C02)。图 10 展示了该建筑在 12 月 1 日至 31 日期间 1 至 4 层的热负荷分布，一层和四层的热负荷比例最高，分别达到 34%和 33%，而第二层和第三层的热负荷比例较低，最低分别为 27%和 25%。第二层和第三层的热负荷比例紧随其后，分别为 23.8%和 23%，最低为 19.2%和 19%。

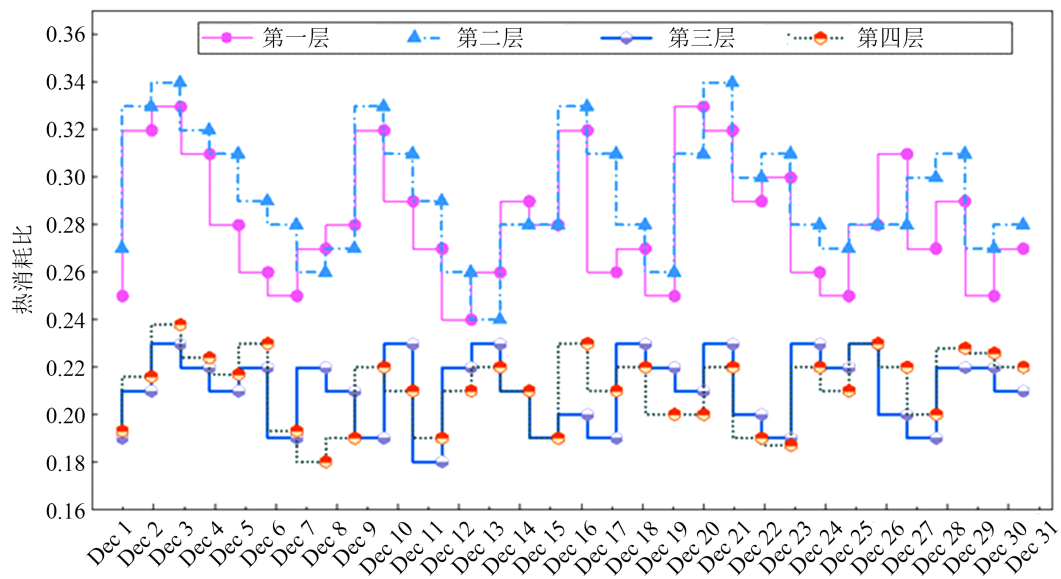


Figure 10. Heat consumption ratio of 1st to 4th floors

图 10. 一至四层热耗比

热负荷分摊矩阵

如图 11 所示, 针对同一楼层不同位置的房间, 选取 12 月 7 日至 13 日的气象条件作为影响因素。结果表明, 在一层中, 右侧房间的热负荷消耗最高, 变化范围从最低 34% 到最高 43%; 左侧房间热负荷消耗范围从 28% 到 38%; 中间房间的热负荷消耗最低, 最低为 24%, 最高为 30%。

在第二层中, 右侧房间的热负荷消耗比例从 21% 到 43% 不等, 左侧房间从 28% 到 42%, 中间房间从 25% 到 36%; 在三楼, 右侧房间的消耗比例从 23% 到 44% 不等, 左侧房间从 32% 到 43%, 中间房间从 27% 到 32%。在顶层, 右侧房间的比例变化范围从 23.4% 到 44%, 左侧房间从 32% 到 42%, 中间房间从 27% 到 32%。进而建立热负荷分摊矩阵。

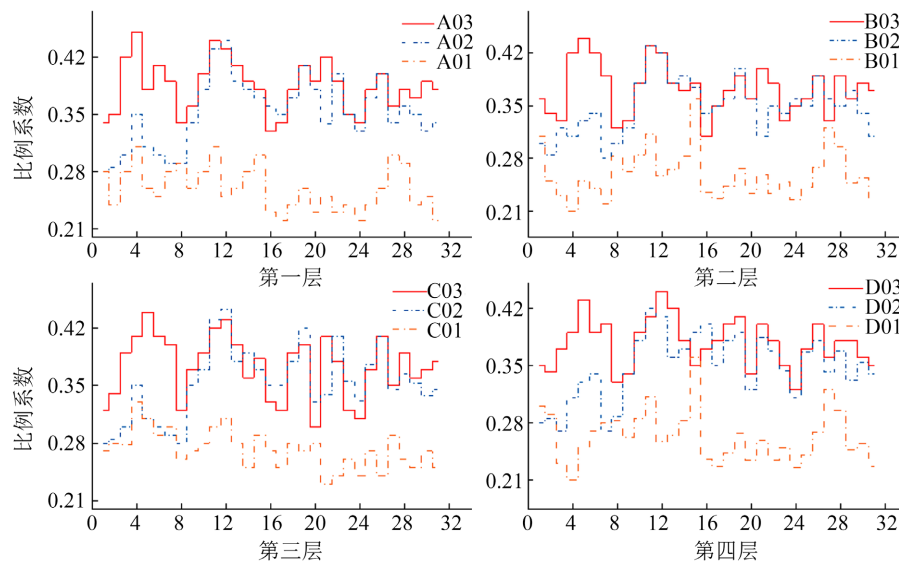


Figure 11. Room heat load ratio of left, middle and right areas

图 11. 左、中、右区域的房间热负荷比

3.2.3. 目标房间热负荷预测结果

基于所提出的热负荷分配矩阵,使用 CNN-Transformer 模型对整个建筑的热负荷进行了预测,结果如图 12 所示。图中展示了 1 楼、2 楼、3 楼、4 楼各区域目标房间的预测热负荷。可以看出,各个房间的预测热负荷与实际值呈现出一致的趋势。这一结果表明,所提出的方法能够有效地反映实际热负荷的变化。

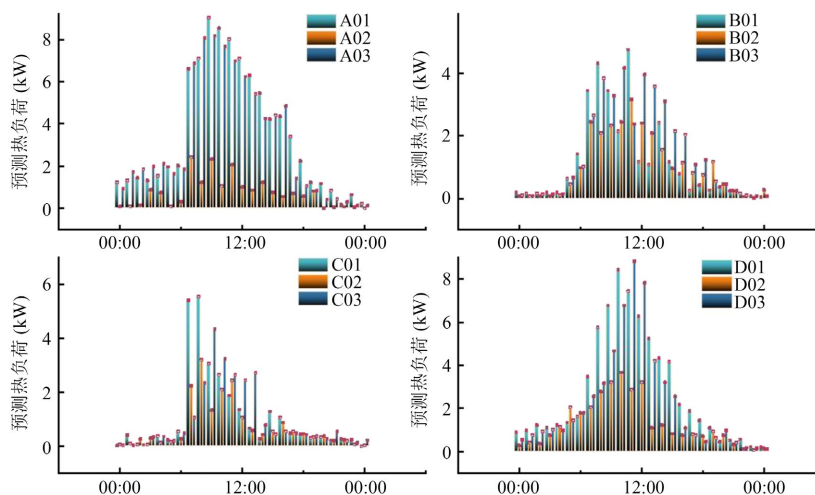


Figure 12. Prediction of target room heat load in each area

图 12. 各区域目标房间热负荷预测

3.3. 基于动态负荷预测分房间温度控制分析

3.3.1. 房间温度控制

为了实现房间温度控制,采用了开关控制策略。当实际热负荷需求低于预测热负荷时,打开水泵阀门直至达到预测热负荷;当实际热负荷需求高于预测热负荷时,则关闭水泵阀门。通过动态调整末端阀门,保持房间温度稳定在设定值,如表 2 所示。

Table 2. Control status of room water pumps at different moments under traditional control strategies

表 2. 传统控制策略不同时刻下房间水泵控制状态

区域 时刻	A01	A02	A03	B01	B02	B03	C01	C02	C03	D01	D02	D03
08:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09:00	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
10:00	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
11:00	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
13:00	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
14:00	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1
16:00	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
17:00	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
18:00	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
19:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

基于各功能区域的热特性差异及人员作息规律，针对办公建筑不同分区的舒适度需求特征，对原有通断控制系统进行精细化调控策略优化，图 13 为控制策略三维图。

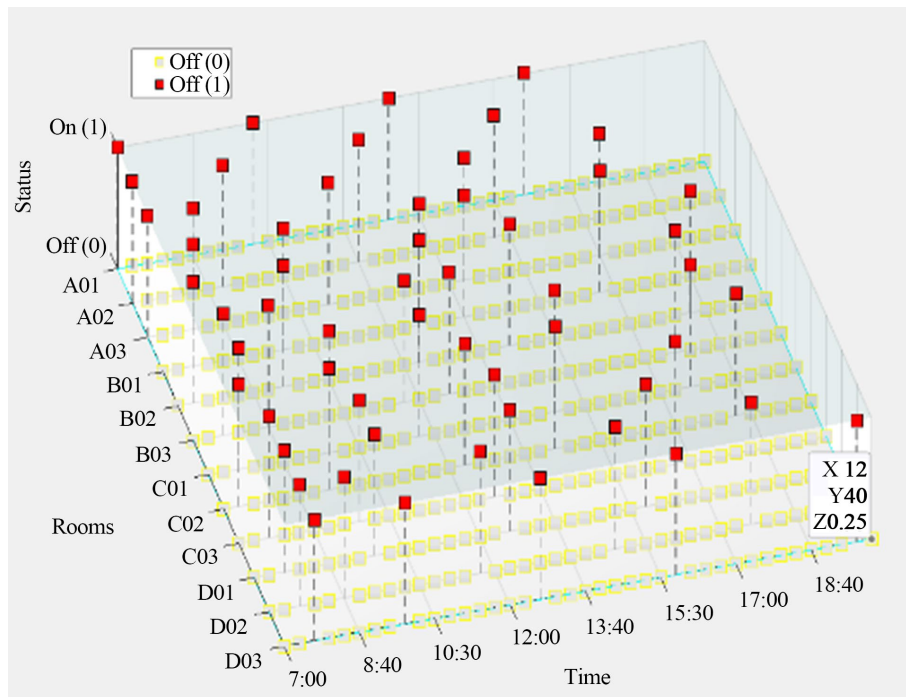


Figure 13. On-off control diagram of terminal rooms with introduced control strategy
图 13. 引入控制策略的末端房间通断控制图

3.3.2. 控制结果

为验证控制效果的可靠性，选择了 12 月连续 7 天进行仿真研究。控制结果如图 14。房间在早 8 点至晚 8 点的工作时间内，初期因水箱温度偏低，室内温度较低，需依赖天然气供暖。随着太阳辐射增强，太阳能集热器中的水温上升，通过管道系统传输至水箱，系统切换至太阳能供热模式。最终，房间温度稳定在 18℃ 左右。第 11 小时，室外低温导致室内温度略高，接近 18℃，其余时间温控较为稳定。

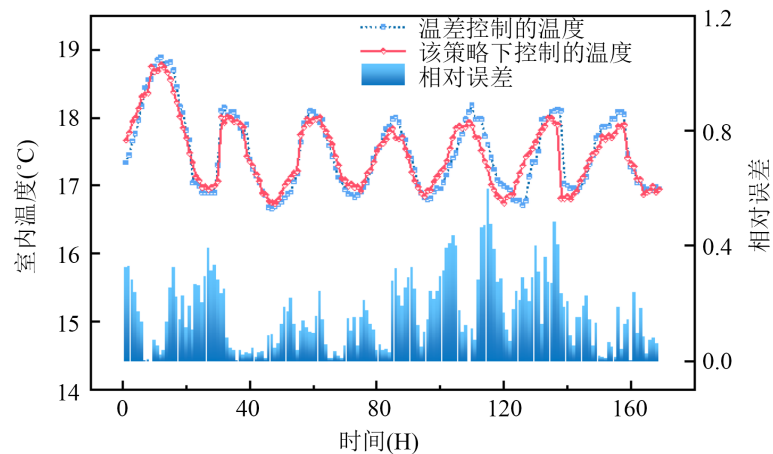


Figure 14. Room temperature variation under different control strategies
图 14. 不同控制策略房间温度变化

对所有房间的调控结果进行统计分析表明, 各区域室内温度均能够稳定维持在设定舒适区间内, 控制策略在不同功能区域均表现出良好的适应性。选其中一种房间类型展示, 如图 15 所示, 在未工作阶段, 室内温度保持在约 14℃。8 点后, 温度逐步升高至设定值 18℃。未引入预测负荷时, 室内温度于 8 点 50 分平均达到设定值, 最大超调为 1.2℃, 随后逐渐稳定。引入预测负荷后, 室内温度在 8 点 25 分左右平均达到设定温度, 最大超调降至 0.6℃。

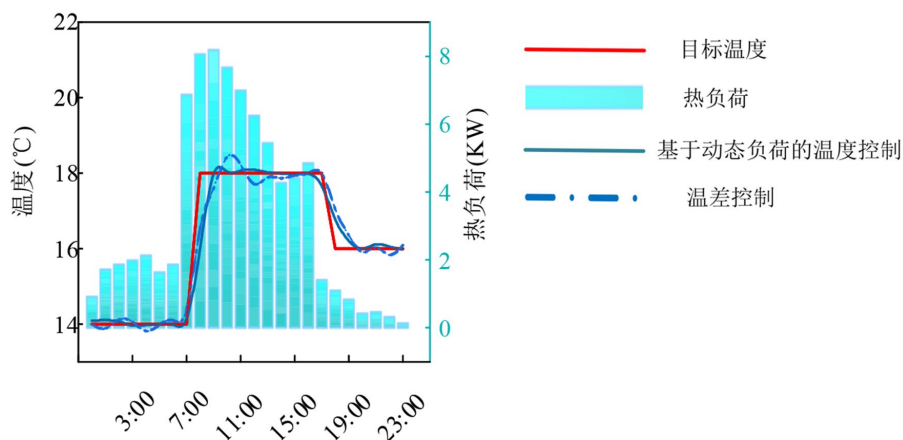


Figure 15. Terminal room temperature variation
图 15. 末端房间温度变化

3.3.3. 经济性分析

从工程经济性角度分析, 本方法具有以下三方面优势:

(1) 无需附加硬件, 改造成本低。通过整体建筑热负荷预测结合热负荷分摊矩阵实现房间级负荷预测, 无需在每个房间安装额外的温度传感器、阀门执行器或室内温控器, 完全依托既有供热系统的通断阀硬件, 大幅降低了既有建筑智能化改造的初期投入。

(2) 计算效率高, 控制器要求低。采用基于规则的前馈-反馈控制结构, 完全避免在线优化求解, 计算负荷极低, 无需配备工控机或高性能服务器, 显著降低了硬件采购与部署成本。

(3) 维护成本低, 工程推广性好。本方法采用数据驱动的预测模型, 无需进行复杂的物理建模和参数辨识过程, 系统部署后可通过历史数据在线更新模型以适应建筑热特性变化, 无需频繁人工校准, 降低了长期运维的技术门槛和人力成本。

综上, 本方法为既有建筑供热系统智能化改造提供了一种低投入、易部署、易维护的软件级解决方案, 具有良好的工程经济性和推广价值。

4. 结论

本文提出了一种基于空间分布特性的动态负荷预测方法, 旨在分析建筑不同位置的热负荷消耗, 并构建热负荷分摊矩阵(层级及房间级)。该方法通过数据驱动预测整体建筑热负荷, 进而推算各层级和用户的热负荷。引入动态负荷预测模型对末端用户进行精细化温控, 显著减少了传统暖通系统中的滞后问题。主要结论如下:

1) 热负荷分摊矩阵的动态负荷预测: 依据建筑空间分布特性构建的热负荷分摊矩阵, 可迅速估算各房间的热负荷。通过对建筑实际情况的模拟, 制定了分配规则。顶层、中层和底层的权重分别为 35%、31%和 34%; 左侧、中部和右侧的权重分别为 29%、37%和 34%。该方法不仅考虑负荷的动态变化, 还

预测未来负荷波动，为温控提供数据支持。

2) 基于动态负荷预测的末端控制策略：与传统反馈控制相比，本研究提出的基于动态负荷预测的控制策略，在不同负荷条件下保持系统稳定，减少滞后性，提高温控精度和响应速度，室温可提前 35 分钟达到设定值，且超调量平均减少 0.6℃。

基金项目

国家自然科学基金(52568019)；内蒙古自然科学基金(20240N05042)；内蒙古自然科学基金(2025MS05017)；高校基本科研业务费项目(2024QNJS070)；高校基本科研业务费项目(2024QNJS012)；高校基本科研业务费项目(2024YXXS020)。

参考文献

- [1] Matsko, T.N., Moss, W.H. and Scheib, T.J. (1982) Optimal Boiler Load Allocation in Distributed Control. 1982 *American Control Conference*, Arlington, 14-16 June 1982, 1140-1145. <https://doi.org/10.23919/acc.1982.4788035>
- [2] Du, Y., Zhou, Z. and Zhao, J. (2022) Multi-Regional Building Energy Efficiency Intelligent Regulation Strategy Based on Multi-Objective Optimization and Model Predictive Control. *Journal of Cleaner Production*, **349**, Article ID: 131264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131264>
- [3] Håkansson, H., Odenberger, M. and Göransson, L. (2024) Effects on District Heating Networks by Introducing Demand Side Management of Building Heat Loads. *Energy and Buildings*, **302**, Article ID: 113932.
- [4] Quaggiotto, D., Vivian, J. and Zarrella, A. (2021) Management of a District Heating Network Using Model Predictive Control with and without Thermal Storage. *Optimization and Engineering*, **22**, 1897-1919. <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09644-w>
- [5] Santos, L.D.O., AlSkaif, T., Barroso, G.C. and Carvalho, P.C.M.D. (2024) Photovoltaic Power Estimation and Forecast Models Integrating Physics and Machine Learning: A Review on Hybrid Techniques. *Solar Energy*, **284**, Article ID: 113044. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113044>
- [6] Sikaroudi, A.E. and Park, C. (2021) A Mixture of Linear-Linear Regression Models for a Linear-Circular Regression. *Statistical Modelling*, **21**, 220-243. <https://doi.org/10.1177/1471082x19881840>
- [7] Sikdar, S., Ganguly, N. and Mukherjee, A. (2016) Time Series Analysis of Temporal Networks. *The European Physical Journal B*, **89**, Article No. 11. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2015-60654-7>
- [8] Capogrosso, L., Cunico, F., Cheng, D.S., Fummi, F. and Cristani, M. (2024) A Machine Learning-Oriented Survey on Tiny Machine Learning. *IEEE Access*, **12**, 23406-23426. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3365349>
- [9] Guo, Y., Jia, M., Su, C., Darkwa, J., Hou, S., Pan, F., et al. (2025) A Novel CALA-STL Algorithm for Optimizing Prediction of Building Energy Heat Load. *Energy and Buildings*, **328**, Article ID: 115207. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115207>
- [10] Pakanen, J. and Karjalainen, S. (2006) Estimating Static Heat Flows in Buildings for Energy Allocation Systems. *Energy and Buildings*, **38**, 1044-1052. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.12.002>
- [11] Zhang, H., Yin, D., Lin, X., Liu, R., Zhong, W. and Cao, C. (2020) Load Distribution Optimization of Multi-Source District Heating System Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *IEEE Access*, **8**, 209074-209090. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3038381>
- [12] Chen, Y., Galal, K.E. and Athienitis, A.K. (2016) Integrating Hollow-Core Masonry Walls and Precast Concrete Slabs into Building Space Heating and Cooling. *Journal of Building Engineering*, **5**, 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.12.008>
- [13] Zhang, D., Cai, N., Cui, X., Xia, X., Shi, J. and Huang, X. (2019) Experimental Investigation on Model Predictive Control of Radiant Floor Cooling Combined with Underfloor Ventilation System. *Energy*, **176**, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.102>
- [14] Wasilowski, H., Reinhart, C. and Samuelson, H.W. (2009) Modeling an Existing Building in DesignBuilder/EnergyPlus: Custom vs. Default Inputs. *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, 27-30 July 2009, 1252-1259.
- [15] Solghar, A.A., Rabiei, M. and Forghani, A.H. (2025) A Comprehensive Investigation of Thermal Characteristics of Beam-Blocks, Concrete Slab, U-Boot Slab and Waffle Slab Flooring Systems of Buildings through CFD Simulations. *Energy*, **318**, Article ID: 134747. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134747>
- [16] ASHRAE (2021) ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

Engineers.

- [17] Reddy, T.A., Maor, I. and Panjapornpon, C. (2007) Calibrating Detailed Building Energy Simulation Programs with Measured Data—Part I: General Methodology (RP-1051). *HVAC&R Research*, **13**, 221-241.
<https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390952>