XXXX

基于日前电价预测的热泵耦合储热系统柔性控制策略研究

刘泰吉[1]，窦研哲[1]，李　宁[2]，徐宝萍[1△]，王　锡[1]
（[1]华北电力大学，北京 102206；[2]建科公共设施运营管理有限公司，北京 100120）

摘 要：需求响应（DR）是实现电力供需实时平衡的关键技术，而实时电价（RTP）作为灵活有效的DR信号，能精准反映系统运行状态。然而，对于耦合相变储热（PCTS）的热泵供暖系统，RTP驱动的DR控制需同时应对电价、热负荷及储/放热特性的时变耦合，对控制方法提出严峻挑战。为此，本文提出一种面向RTP的新型DR控制策略，应用于热泵耦合PCTS供暖系统。基于TRNSYS建立普通散热器、相变散热器和相变墙体三类系统，提出以日前交易电价预测为输入的启发式控制策略，并分析比较不同末端、控制策略与电价机制的影响。相较比例控制，启发式控制使三类系统耗电量分别降低29.5%、14.0%和15.4%，电费分别降低65.2%、49.5%和57.3%；两类相变系统在交易电价下均实现100%高峰期负荷转移，峰谷差降低约54.5%。相变散热器系统因蓄放热响应更快，柔性优于相变墙体系统。上述结果是在北京寒冷地区单房间模型、严寒期典型5 d、18~22℃舒适约束及确定性气象、负荷和设备参数条件下获得；交易电价仅作为日前调度信号，相关电费为价格信号加权电能量成本，定量结果不宜直接外推至其他气候区、建筑类型或终端结算场景。在上述适用边界内，研究结果可为热泵耦合储热供暖系统的需求响应控制提供参考。

关键词：供暖系统柔性；相变墙体；相变散热器；启发式控制；交易电价机制
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0799
中图分类号：TU 832　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-13

Flexible Control Strategy of Heat Pump-Thermal Storage Systems Using Forecasted Day-Ahead Electricity Trading Prices

Liu Taiji[1], Dou Yanzhe[1], Li Ning[2], Xu Baoping[1△], Wang Xi[1]
([1]North China Electric Power University, Beijing, 102206, China; [2]Jianke Public Facility Operation Management Co., Ltd, Beijing, 100120, China)

Abstract: Demand response (DR) relies on real-time electricity price (RTP) as a highly effective signal for supply-demand balancing, yet its application to heat-pump systems integrated with phase-change thermal storage (PCTS) is challenged by coupled temporal variations in price, thermal load, and storage dynamics. This study proposes a novel RTP-driven DR control strategy for HP-PCTS heating systems. Three TRNSYS models—a conventional radiator, phase-change radiator, and phase-change wall—are developed. A day-ahead-price-based heuristic control is proposed. Compared with proportional control, the

收稿日期：2026-09-11；修改稿日期：2026-10-23。
基金项目：国家自然科学基金面上项目 （No. 52278106）。
第一作者：刘泰吉（2002—），男，在读硕士研究生，研究方向为储热系统柔性调控，E-mail：ltj18763301300@163.com；通信作者：徐宝萍，副教授，研究方向为区域能源规划与柔性调控，E-mail：xubp@ncepu.edu.cn 。
引用本文：刘泰吉, 窦研哲, 李宁, 等. 基于日前电价预测的热泵耦合储热系统柔性控制策略研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.
Citation：Liu Taiji, Dou Yanzhe, Li Ning, et al. Flexible Control Strategy of Heat Pump-Thermal Storage Systems Using Forecasted Day-Ahead Electricity Trading Prices[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

proposed method reduces power consumption by 29.5%, 14.0%, and 15.4%, and electricity costs by 65.2%, 49.5%, and 57.3%, respectively. Both PCM systems achieve 100% peak-period load shifting under trading prices and reduce the peak-valley difference by about 54.5%. The faster PCM radiator provides better flexibility. These results are limited to a deterministic Beijing single-room model, a representative five-day severe-winter period, and an 18—22℃ comfort constraint. Trading price is a dispatch signal, not a billing tariff; quantitative results require recalibration for other climates, buildings, equipment, or billing contexts.

Keywords: Heating system flexibility; Phase-change wall; Phase-change radiator; Heuristic control; Trading electricity price mechanism

“碳中和”已成为全球共同目标[1]。未来可再生能源将成为电力结构主体，火电仍需承担其间歇性和波动性的调节任务[2]。建筑供暖系统中，围护结构和末端设备具有可观的被动蓄热潜力；利用该潜力参与需求响应，是实现热电协同、可再生能源消纳和供需平衡的低成本技术路径[3-4]。

供暖控制的研究重点已由维持室温转向节能降耗、热电协同、需求响应和可再生能源消纳[5-7]。随着计算技术与优化算法发展，易于工程应用的启发式控制受到关注。Dengiz等[8]分别以成本和能耗最小为目标，结果显示供暖成本可降低4.1%~13.3%，能耗可降低38.3%~52.6%；Rodríguez等[9]指出，基于启发式优化的热泵系统可为电网提供可观灵活性。

相变材料具有高能量密度和良好蓄热性能，已应用于围护结构和主动储热系统。Wang等[10]将相变材料集成于围护结构并采用需求侧管理，在动态电价下实现32.78%的能量柔性、约90%的峰值负荷削减，同时降低能耗、电费和碳排放。Gholamibozanjani等[11]则表明，主动式相变储热可使室内温度处于舒适区的时间延长54%。

现有研究多考察单一因素，较少揭示“末端类型—控制策略—电价信号”的耦合影响。在高比例可再生能源情景下，动态交易电价下供暖系统的响应特性尚未深入研究；相变散热器作为新型末端，其柔性调控机理和量化贡献亦有待明确。

为此，本文构建“末端类型—控制策略—电价信号”耦合分析框架，选取普通散热器、相变散热器和相变墙体三类系统，在比例控制和基于日前电价预测的启发式控制下，分别比较分时与交易电价机制中的运行特性。进一步基于LSTM建立日前交易电价预测模型，将动态电价信号引入控制，并量化相变散热器的柔性调控作用。

1 供暖系统模型

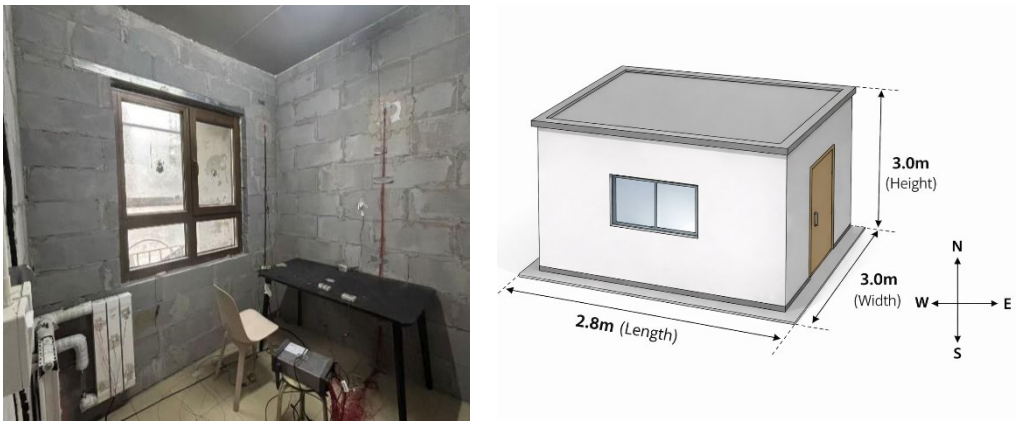
1.1 建筑模型及物理参数

本文仿真对象为真实存在的北京某建筑实验房，如图1所示。该建筑的房间尺寸为3m×2.8m×3m，南向外墙的窗墙比为0.3。建筑相关热工参数满足寒冷地区居住建筑节能设计标准《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ26-2018。其中，典型围护结构的主要材料及热工参数见表1。

表1 围护结构主要材料及热工参数

Table 1 Main materials and thermal parameters of building envelope

	外墙	内墙	屋顶	地面	窗户
主要材料	加气保温砖	轻质砖	聚氨酯泡沫	混凝土	双层中空塑料窗
密度/(kg/m^3)	625	706	55	1930	2 500
定压比热/(J/(kg·K))	1050	920	1570	1010	840
导热系数/(W/(m·K))	0.20	0.16	0.024	1.51	0.76
厚度/mm	240	120	100	1000	6
外表面换热系数/(W/(m^2·K))	23.0	8.7	23.0	4.65	23.3
内表面换热系数/(W/(m^2·K))	8.7	8.7	8.7	4	8.7



(a) 建筑内部图片　　(b) 建筑物理示意图

图1　建筑示意图

Fig.1　Schematic diagram of the building

室内热扰参数的主要设置为：房间内有1人，人员发热量为53 W/人，设备发热量为10 W/m²，灯光发热量为5 W/m²，通风换气次数为0.5次/h。依据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》，室温设定值为20℃，舒适范围为18~22℃。

为研究相变材料对供暖系统柔性调控效果的提升作用，将散热器替换为相变散热器，如图2所示，其在热水通道外填充相变材料作为储热介质，热水通道与相变材料平行布置；关键热物性参数见表2。

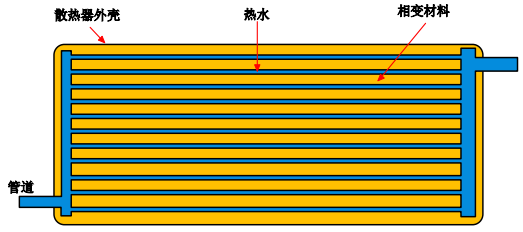


图2　相变散热器物理模型示意图

Fig.2　Schematic diagram of physical model of phase-change heat sink

当相变散热器内相变材料为单相时，其满足能量守恒如下：

$$C_p(\tau)\frac{dt_p(\tau)}{d\tau}=Q_w(\tau)-Q_{loss}(\tau) \tag{1}$$

式中，C_p表示相变散热器的总热容固相或液相），W/K;t_p表示相变散热器内相变材料均匀温度，℃；Q_w表示热水向相变材料传递的热量，W；Q_{loss}表示散热器总放热量，W。

相变散热器结构与传统散热器类似，仅在热水与外壳间填充相变材料作为储热介质，其放热量计算方式，其散热量计算方式如下：

$$Q_{loss}(\tau)=K_pF_p(t_p(\tau)-t_a(\tau)) \tag{2}$$

式中，K_p表示相变散热器的综合传热系数，W/(m²·K)；F_p表示散热器表面面积，m²；t_a表示房间空气温度，℃。

散热器内热水向相变材料传递的热量计算如下：

$$Q_w(\tau)=\varepsilon G_{wp}C_{wp}(t_{wpin}(\tau)-t_p(\tau)) \tag{3}$$

式中，ε表示水-管壁-相变材料之间的综合传热效率；G_{wp}表示供水流量，kg/s；C_{wp}表示管内水的比热，J/(kg·K)；t_{wpin}表示管内热水温度，℃。

当散热器内相变材料发生相变时，其温度恒定保持在相变温度T_m，能量变化仅表现为相变潜热，并只改变相变材料的固相质量分数x(0≤x≤1)。

散热器内存在如下能量平衡：

$$\Delta Q_m(\tau)=Q_w(\tau)-Q_{loss}(\tau) \tag{4}$$

则其时间步长$\Delta\tau$内固相质量分数的变化为：

表2　相变散热器内置相变材料热物性参数

Table 2　Thermophysical parameters of PCM embedded in phase-change heat sink

相变材料参数	数值
液相比热(kJ/(kg·K))	2
液相密度(kg/m³)	900
融化潜热(kJ/kg)	180
相变温度(℃)	25
初始温度(℃)	18
固相比热(kJ/(kg·K))	1.8
固相密度(kg/m3)	950

$$\Delta x = -\frac{\Delta Q \Delta \tau}{h_p M_p} \tag{5}$$

式中，h_p表示相变材料的相变潜热，J/kg；M_p表示散热器内相变材料总质量，kg。

相变材料在相变过程中存在一定的非线性热物性特征，其等效热容并非恒定值，而是随相变过程持续改变，因此需要在模型中对该动态特性进行充分考虑[12]。

$$C_p(\tau) = C_{psol} + (1 - x(\tau)) \cdot (C_{pliq} - C_{psol}) + \frac{12}{T_{liq} - T_{sol}} \cdot x(\tau)(1 - x(\tau))h_p \tag{6}$$

式中，C_{psol}表示相变材料固态时的比热容，J/(kg·K)；C_{pliq}表示相变材料液态时的比热容，J/(kg·K)；T_{liq}表示相变材料液化温度，℃；T_{sol}表示相变材料固化温度，℃。

进一步研究相变材料对供暖系统柔性调控效果的提升作用，在该建筑模型基础上，进一步构建耦合相变材料的围护结构模型。相变墙体是将原有围护结构的中心插入一层相变材料而成的复合墙体，其构造如图3所示。相变材料选用适用于建筑供暖温度范围的有机石蜡基相变材料，其关键热物性参数见表3。

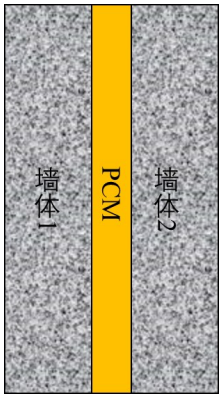


图3 相变墙体结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of phase change wall structure

1.2 供热系统模型

(1) 热泵模型

本文考虑热源为空气源热泵。热泵与建筑供暖系统的关联参数主要包括热水流量、供水温度和回水温度。在忽略建筑供回水管网热损失的条件下，热泵的耗电功率(W(t))可表示为：

$$W_{hp}(\tau) = Q_{hp}(\tau)/COP(\tau) \tag{7}$$

$$Q_{hp}(\tau) = C_w \cdot G_w(\tau) \cdot (t_g(\tau) - t_h(\tau)) \tag{8}$$

表3 相变墙体内相变材料热物性参数

Table 3 Thermophysical properties of phase change material in phase change wall

相变材料参数	数值
材料面积(m^2)	8
材料厚度(m)	0.03
初始温度(℃)	18
材料密度(kg/m^3)	900
液相比热(kJ/(kg·K))	2.08
固相比热(kJ/(kg·K))	2.13
融化温度(℃)	20
固化温度(℃)	20
融化潜热(kJ/kg)	180

式中，Q_{hp}空气源热泵的供热量，W；COP为热泵性能系数；G_w为系统热水流量，kg/s；t_h为热泵回水温度，℃；t_g为供水温度，℃；C_w为水的比热容，J/(kg·K)。

对于选定的热泵设备，其运行性能系数主要受蒸发温度、冷凝温度影响。其中，冷凝温度与供水温度密切相关，而蒸发温度主要受室外温度影响。因此，空气源热泵的性能系数（COP）可表示为供水温度和室外温度的函数：

$$COP(T) = f(t_g(T), t_{out}(T)) \tag{9}$$

式(9)的具体函数关系可根据空气源热泵产品样本中的性能数据（如图4所示），通过参数辨识方法建立。

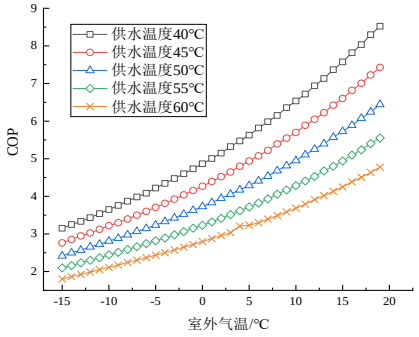


图4 不同供水温度及外温下的热泵COP

Fig.4 COP of heat pump under different water supply temperatures and outdoor temperatures

(2) 水泵功耗

对于空气源热泵供暖系统，循环水泵功耗根据式(10)计算。

$$W_{cp} = G_w g \Delta H / \eta \tag{10}$$

式中，W_{cp}为循环水泵的耗电功率，W；G_w为水流量，kg/s；g为重力加速度，取9.8 N/kg；ΔH为水泵扬程，mH_2O；η为水泵效率。

(3) 供水温度控制策略

热泵供暖系统的供水温度应根据供热负荷的变化进行调节。相对热负荷比例系数δ(τ)可表示为室外温度、太阳辐射和通风量的函数，如下：

$$\delta(\tau)=\frac{K_zF(t_{set}-t_{out})+C_{pa}\rho_aG_a(t_{set}-t_{out})-q_{sol}}{K_zF(t'_a-t'_{out})+C_{pa}\rho_aG'_a(t'_a-t'_{out})-q'_{sol}} \quad (11)$$

式中，K_Z为外围护结构综合传热系数，W/(m^2·K)；F为外围护结构表面积，m^2；t_{set}为室温设定值，℃；t_{out}为室外温度，℃；C_{pa}为空气定压比热容，J/(kg·K)；ρ_a为空气密度，kg/m^3；G_a为通风换气量，m^3；q_{sol}为太阳辐射得热量，W；t'_a为室温设计值，℃；t'_{out}为室外温度设计值，℃；G'_a为通风换气量，m^3；q'_{sol}为设计太阳辐射得热量。

根据热量守恒定律，得到基于气候补偿的供水温度调节公式如下：

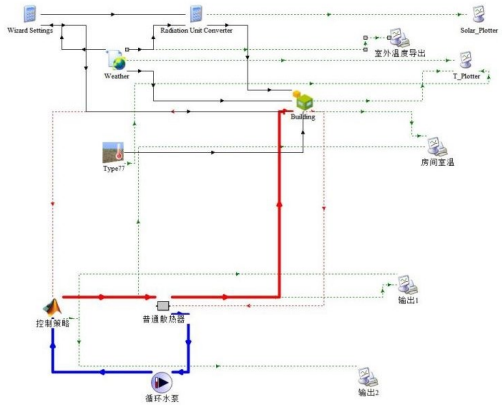
$$t_g(\tau)=t_{set}+0.5(t'_g+t'_h-2t_{set})\cdot\delta(\tau)+0.5(t'_g-t'_h)\cdot\delta(\tau) \quad (12)$$

式中，t'_g为热泵设计供水温度，℃；t'_h为热泵设计回水温度，℃。

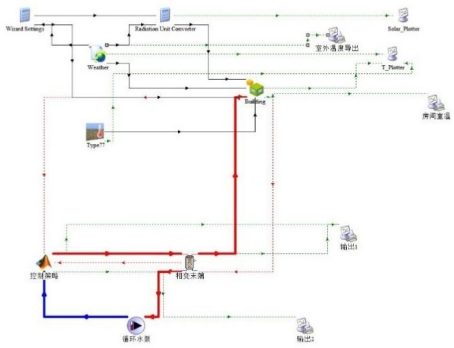
(4) 供暖系统构建为系统研究不同末端形式、相变材料集成方式以及不同控制策略对供暖系统柔性调控效果的影响，本研究在TRNSYS环境下分别搭建了普通散热器、相变散热器和相变墙体三种供暖系统仿真模型，如图5所示。

1.3 模型验证

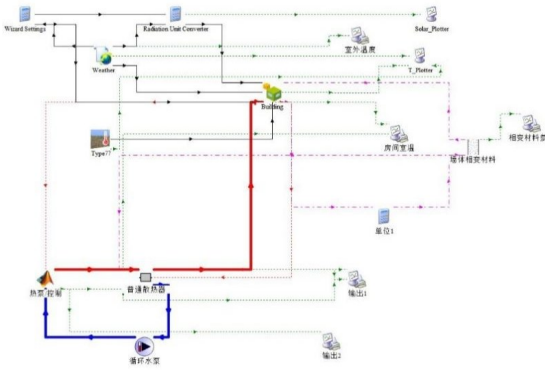
为确保所搭建的TRNSYS供暖系统模型能够准确反映实际系统的动态热行为，以实际实验房室内空气温度为指标进行对比。图6为模拟室温与实测室温对比，可见在120 h验证期内，模拟值能够较好跟随实测温度变化，最大温差不超过0.5℃。因此，所建模型可较准确反映房间热行为，满足后续运行策略仿真分析的精度需求。



5a) 普通散热器供暖系统图



5b) 相变散热器供暖系统图



5c) 围护结构耦合相变材料供暖系统图

图5 供暖系统仿真模型系统图

Fig.5 System diagram of heating system simulation model

2 交易电价预测模型

2.1 基于LSTM神经网络模型

为使热泵供暖系统能够根据日前电价信号提前调整运行状态，本文构建基于LSTM神经网络的日前交易电价预测模型，并将预测结果作为启发式控制策略的输入条件。LSTM神经网络具有较强的长期记忆能力，能够同时建模时间序列中的长期依赖与短期动态特征，因此适用于处理和预测电价这种包含时间间隔与滞后效应的序列数据。

由于北京尚未进入现货市场连续结算试运行阶段，本研究采用山东电力现货市场历史价格及运行数据作为实时电价预测数据集。其价格信号具有以下特征：（1）日内波动显著，负电价频发，峰谷价

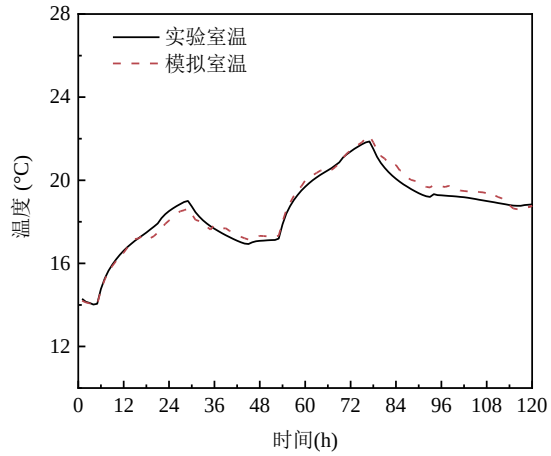


图6 室温验证结果

Fig.6 Verification results of indoor temperature

差居全国前列；（2）数据公开可查，来源为山东电力交易中心官方披露平台；（3）市场机制成熟，价格形成具有代表性。上述特征使其可作为评估热泵系统需求响应潜力的输入条件。数据选用2025年8760组逐时交易电价及对应运行数据。缺失值采用相邻3 d同一时刻均值填补，异常值以|Z-Score|>3识别并替换，采用Min-Max方法对数据进行归一化处理。

模型输入参数如表4所示。输出参数为下一日逐时交易电价。本文采用国内某省全年交易电价及相关运行数据进行模型训练，并对原始数据中的缺失值和异常值进行预处理。

表4 神经网络输入特征参数

Table 4 Input feature parameters of neural network

序号	特征参数描述
1	全网负荷曲线
2	直调负荷曲线
3	联络线曲线
4	地方电厂出力曲线
5	自备机组出力曲线
6	试验机组出力曲线
7	风电出力曲线
8	光伏出力曲线
9	核电出力曲线

本文搭建的LSTM神经网络包括以下五部分：输入向量、LSTM隐含层、ReLu激活层、全连接层以及最终的输出预测值。输入层节点数9个，LSTM隐含层含32个隐藏单元，全连接层一个隐藏单元。优化算法为Adam，初始学习率为0.001，学习率衰减因子为0.5，最大迭代次数为1200。数据集按70%、15%、15%划分为训练集、验证集和测试集。基于验证集表现调整超参数，最终使用测试集评估泛化性能。

2.2 神经网络模型验证完成模型训练后，采用实际交易电价数据对预测结果进行验证，预测值与实测值对比如图6所示。结果表明，预测曲线能够较好反映实际交易电价的波动趋势，独立测试集的电价预测平均绝对误差MAE为13.7 元/MWh，相关系数R^2为0.96，能够满足本文供暖系统日前运行控制对电价趋势判断的需求。

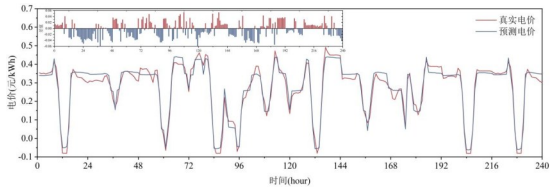


图7 交易电价预测值与实际值对比

Fig.7 Comparison between predicted and actual values of trading electricity price

为评估预测模型对启发式控制策略的支撑作用，进一步统计峰、平、谷时段识别准确率。时段划分规则为：将每日24 h电价由低到高排序，并划分低谷、平段和高峰各8 h。以实际电价划分结果为基准，预测电价划分结果的逐时分类准确率约为84.6%。

图8对比了预测交易电价与传统分时电价的时段划分。二者峰、平、谷时段分布差异明显，说明固定分时电价难以反映可再生能源出力和负荷变化造成的供需关系。将日前交易电价引入供暖控制，有助于提高热泵运行与电网状态的匹配度。

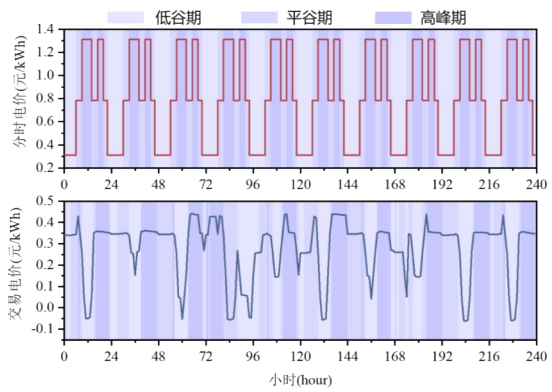


图8 分时电价信号与交易电价信号

Fig.8 Time-of-use electricity price signal and trading electricity price signal

3 供暖系统控制策略

为分析供暖系统柔性调控效果，本文选取不考虑系统柔性的比例控制策略作为基准，并引入基于日前电价预测的启发式控制作为柔性控制策略。两种控制策略均采用相同的热舒适阈值（18~22℃），差异仅在于控制逻辑。

3.1 比例控制

传统比例控制是不考虑供暖系统柔性调控的常见控制策略，仅依据当前室温来调整下一时刻的控制状态。本文中房间舒适室温范围设定为18~22℃，因此取其中值20℃作为比例控制策略的调节设定目标，调控对象为供热水泵连接的电动阀门开度。比例调控策略如表5所示。

表5 比例控制策略

Table 5 Proportional control strategy

室内温度	阀门开度
小于18℃	阀门全开
18~22℃	$V_p=(22-t_a(r))/4$
大于22℃	阀门全关

V_P为电动阀门相对开度，取值范围为0~1；$t_a(k)$为k时刻室内空气温度，℃。

3.2 基于日前电价预测的启发式控制

依据日前交易电价预测结果，将日内划分为低谷期和非低谷期。启发式控制的核心是在低谷期优先运行热泵并蓄热，在平谷期和高峰期优先利用建筑本体及相变材料释放的热量维持室温，从而降低高电价时段的热泵负荷。

令$t_a(k)$为第k个时刻室内室温，r为相变材料相变率（$0\leqslant r\leqslant 1$）。

低谷期：当$t_a(k)<18$℃时启动热泵；当$18℃\leqslant t_a(k)<22$℃且$r<1$时继续储热；当$t_a(k)\geqslant 22$℃或$t_a(k)\geqslant 18$℃且r=1时停止热泵。

非低谷期：当$t_a(k)\geqslant 18$℃时，热泵关闭；当$t_a(k)<18$℃且r>0时，优先由相变材料释热；当$t_a(k)<18$℃且$r=0$时，开启热泵，补热至$t_a(k)\geqslant 18$℃后停止。

该策略能够在保障室温舒适的同时，将用电负荷由高电价时段转移至低谷期，提高供暖系统的柔性调控能力。

本文所提启发式控制策略的设计出发点并非追求控制算法的理论完备性，而是面向实际工程部署

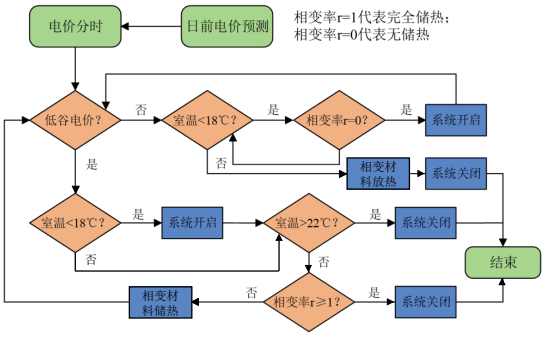


图9 基于日前电价预测的启发式控制

Fig.9 Heuristic control based on day-ahead electricity price forecasting

的可实施性：该策略以日前交易电价预测为外部输入，无需在线求解优化问题，计算负荷低，适用于本地控制器或边缘计算节点的部署条件。对于耦合PCTS的分散式热泵供暖系统而言，这一特征具有实际意义。本研究旨在验证“日前电价时段、室温边界和相变储热状态”如何影响热泵负荷时序，因此选用逻辑清晰、计算量小且可在常规控制器上实现的规则控制，并与比例控制基线比较。该设计有利于单独识别储热状态参与控制的作用，也避免复杂优化算法的参数设置对结果造成额外影响。

关于控制策略的优化空间，研究团队在文献[13]中对基于规则的控制（RBC）与MPC策略的柔性调控效果进行了对比分析，结果表明MPC在柔性指标上具有微弱优势，但算法复杂度显著增加，且对模型精度和预测数据质量的要求更高。该领域系统性综述指出，建筑供暖系统控制策略通常分为RBC与MPC两大类，RBC依赖预定义规则、无需显式求解最优解，计算复杂度低[14]；RBC因其简洁性与鲁棒性在建筑HVAC系统中被广泛采用，但其根本局限在于缺乏预测能力[15]。已有研究进一步量化表明，轻量化规则控制策略的计算成本远低于MPC，而性能损失轻微[16]。

4 模拟结果分析

4.1 模拟工况

需求响应的效果与供暖系统柔性大小密切相关，而其柔性除受建筑本身围护结构热惯性影响外，还与系统类型、控制策略以及室外环境有关。为此，本文选取严寒期的典型时段（5天），分别对三种系统在比例控制和基于日前电价预测的启发式

控制策略下展开仿真模拟，分析其运行特性与柔性调控效果。模拟工况设置如表6所示。

表6 模拟工况设置

Table 6 Simulation working condition settings

序号	控制策略	系统类型	电价信号
模拟工况1	比例控制	普通散热器系统	交易电价
模拟工况2	启发式控制	普通散热器系统	交易电价
模拟工况3	比例控制	相变散热器系统	交易电价
模拟工况4	启发式控制	相变散热器系统	交易电价
模拟工况5	比例控制	相变墙体系统	交易电价
模拟工况6	启发式控制	相变墙体系统	交易电价

仿真模拟的室外环境曲线与热泵供水温度曲线如图10所示。

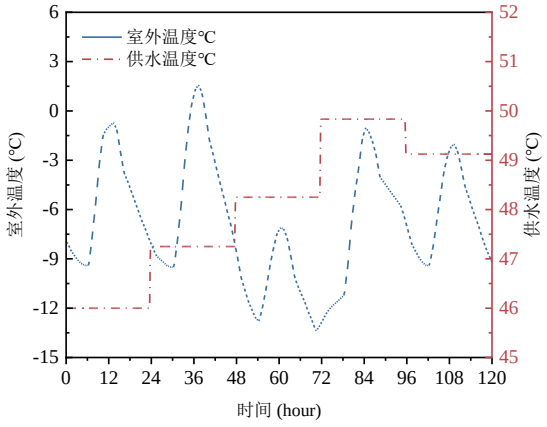


图10 室外温度与热泵供水温度

Fig.10 Outdoor temperature and heat pump supply water temperature

4.2 模拟结果量化分析

为评价不同储热方式、控制策略及电价机制下热泵供暖系统需求响应调控效果，本文选取削峰量、填谷量、负荷转移率和峰谷差降低率四个指标表征系统调控柔性。

（1）削峰量

削峰量定义为需求响应期间，柔性调控策略较基准策略在电网高峰时段减少的用电量Q_{pc}（kWh）：

$$Q_{pc}=\int_{t_1}^{t_2}(P_{base}-P_{fc})dt \tag{13}$$

式中，P_{fc}、P_{base}分别为柔性调控策略和基准策略下热泵供暖系统的用电功率，kW；t_1、t_2分别为表示高峰期起、止时刻。

（2）填谷量

填谷量定义为电网低谷时段，柔性调控策略较基准策略增加的用电量Q_{vf}（kWh）：

$$Q_{vf}=\int_{t_4}^{t_3}(P_{fc}-P_{base})dt \tag{14}$$

式中，t_3、t_4分别为低谷期起、止时刻。

（3）负荷转移率

本文将负荷转移率定义为柔性调控策略下削峰量与基准策略下高峰时段用电量之比：

$$E_{se}=(\int_{t_1}^{t_2}P_{base}dt-\int_{t_1}^{t_2}P_{fc}dt)/\int_{t_1}^{t_2}P_{base}dt \tag{15}$$

（4）峰谷差降低率

峰谷差降低率定义为柔性调控策略下典型日负荷曲线峰谷差（ΔP_{fc}）较基准场景峰谷差（ΔP_{base}）的降低百分比。该指标直观反映了供暖系统柔性调控优化运行对缓解电网峰谷矛盾、提高电网运行平稳性的贡献。

$$\Delta E_{se}=\frac{|\Delta P_{base}-\Delta P_{fc}|}{\Delta P_{base}} \tag{16}$$

4.2.1 普通散热器供暖系统

在典型天分别运用两种不同的控制策略对普通散热器供暖系统进行模拟计算（工况1与工况2），结果如表7所示。

表7 普通散热器供暖系统模拟计算结果

Table 7 Simulation calculation results of conventional radiator heating system

控制策略	高峰期耗电量（kWh）	平谷期耗电量（kWh）	低谷期耗电量（kWh）	总耗电量（kWh）	平均室温（℃）	用电费用（元）
传统比例控制	4.7	5.8	4.4	14.9	20.1	4.17
基于日前电价预测的启发式控制策略	0.7	1.1	8.7	10.5	19.4	1.45

与比例控制相比，启发式控制下平均室温为19.4℃，仍在舒适范围内；总耗电量和电费分别降低29.5%和65.2%。

图11(a)显示，比例控制下普通散热器系统的室温围绕20℃波动，热泵功率在三个时段分布较均匀，这是因为该策略仅按室温实时调节。图11(b)表示在启发式控制下，系统在低谷期满负荷运行，将热量储存在散热器本体与围护结构中；

进入平、峰期后停止或低功率供热，室温自然下降但保持18℃以上。启发式控制策略下系统柔性调控效果如表8所示。

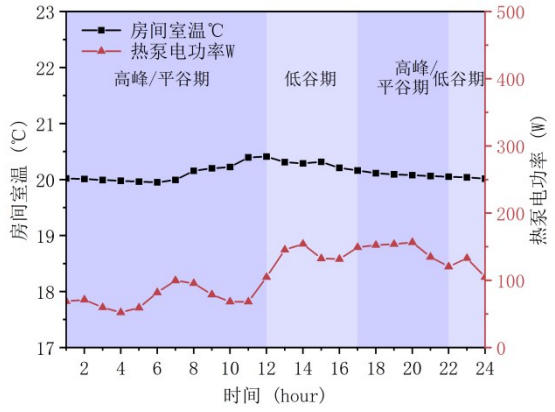
4.2.2 相变散热器供暖系统

在典型天分别运用两种不同的控制策略在对相变散热器供暖系统进行模拟计算（工况3与工况4），结果如表9所示。在比例控制策略下，相变散热器系统比普通散热器系统总耗电量降低了13.4%，这是由于相变材料可在供热过程中吸收部分热量，并在热泵低负荷时段释放。启发式控制下，平均室温为19.8℃，平、峰期耗电量均为0，11.1 kWh用电全部集中于低谷期；总耗电量和电费较比例控制分别降低14.0%和49.5%。

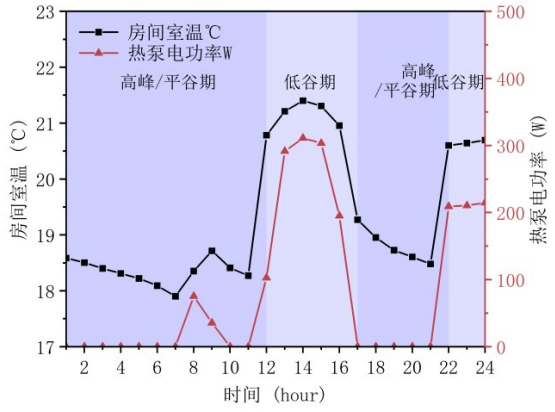
图12(a)显示，比例控制下相变散热器系统的室温和热泵功率波动均小于普通散热器，但相变率长期接近1，潜热储能未被充分利用。图12(b)表示在启发式控制下，低谷期围护结构和相变材料逐步蓄热，液相分数升至约0.6；平、峰期相变材料释放热量，液相分数降至0。启发式控制策略下系统柔性调控效果如表10所示。

4.2.3 相变墙体供暖系统

在典型天分别运用两种不同的控制策略对相变墙体供暖系统进行模拟计算（工况5与工况6），结果如表11所示。比例控制下相变墙体系统的总耗电量较普通散热器低8.7%，但比相变散热器高。启发式控制下，平均室温为19.7℃，总耗电量和电费较比例控制分别降低15.4%和57.3%。但总耗电量相较于普通散热器系统和相变散热器系统分别高出9.5%和3.6%，主要原因是相变墙体作为嵌入墙体内部的被动式储热单元，其蓄放热过程存在一定的传热热阻，导致系统响应时间增加，无法快速响应电价，使系统柔性降低。



(a) 比例控制



(b) 启发式控制

图11 不同控制策略下普通散热器系统典型日运行曲线

Fig.11 Typical daily operation curves of conventional radiator system under different control strategies

图13(a)表明，比例控制下相变墙体系统室温

表8 普通散热器系统启发式控制策略下柔性调控效果

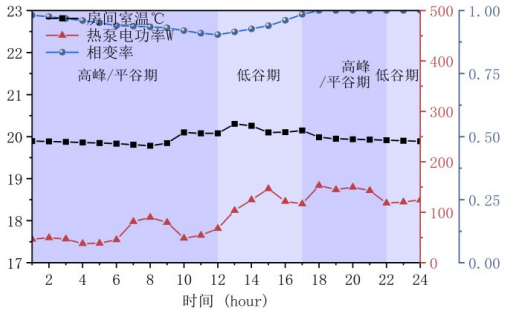
Table 8 Flexible regulation effect of conventional radiator system under heuristic control strategy

系统类型	总耗电量（kWh）	削峰量（kWh）	填谷量（kWh）	负荷转移率	峰谷差降低率
普通散热器系统	10.5	4.0	4.3	85.1%	25.7%

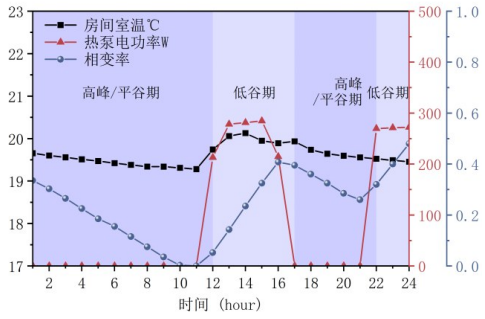
表9 相变散热器供暖系统模拟计算结果

Table 9 Simulation calculation results of phase-change radiator heating system

控制策略	高峰期耗电量（kWh）	平谷期耗电量（kWh）	低谷期耗电量（kWh）	总耗电量（kWh）	平均室温（℃）	用电费用（元）
传统比例控制	3.9	5.3	3.7	12.9	20.0	3.15
基于日前电价预测的启发式控制策略	0	0	11.1	11.1	19.8	1.60



(a) 比例控制



(b)启发式控制

图12 不同控制策略下相变散热器系统典型日运行曲线
Fig.12 Typical daily operation curves of phase-change radiator system under different control strategies

表10 相变散热器系统启发式控制策略下柔性调控效果
Table 10 Flexible regulation effect of phase-change radiator system under heuristic control strategy

系统类型	总耗电量（kWh）	削峰量（kWh）	填谷量（kWh）	负荷转移率	峰谷差降低率
相变散热器供暖系统	11.1	3.9	7.4	100%	54.5%

维持在20.2~20.6℃，波动小于0.5℃，相变率长期为1，潜热未得到有效利用。图13(b)表明在启发式控制下，其运行规律与相变散热器相似，但因蓄放热速率更低、响应更慢，相变率变化幅度较小，平谷期仍存在一定热泵负荷。相变墙体系统在启发式控制策略下的柔性调控效果如表12所示

本文核心研究焦点是耦合PCTS的热泵供暖系统在RTP信号下的DR控制策略，因此案例以北京气候条件为输入，聚焦不同储热方式（普通散热器、相变散热器、相变墙体）、控制策略及电价机制的对比分析。本文所建模型框架具有一定可迁移性，其向相关场景拓展的适用性已在研究团队其他工作中得到初步验证。例如，不同气候条件对建筑供暖系统柔性潜力的影响在文献[13]中进行了系统分析，随着外温下降，削峰量增加而削峰率略有降低；不同建筑类型、多房间耦合及热网惯性对系统动态特性的影响在文献[17-19]中进行了讨论，热惯性大的系统热响应较慢但柔性潜力更大；人员行为对DR参与不确定性的影响在文献[20]中进行了量化分析，当参与用户数大于648时，柔性评估不确定性低于10.5%。上述因素均可纳入本文柔性评价框架，在建模方法上具有可迁移性，但各自对应独立的建模与参数设定需求。

4.3 电价机制影响分析

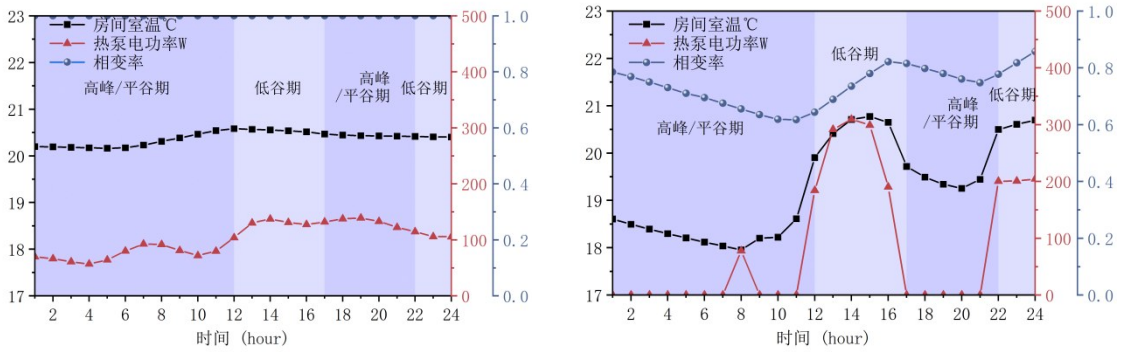
现有柔性调控多采用固定分时电价，但随着可再生能源占比提高，电力市场将向更灵活的交易机制演变。在确定的建筑、设备、气象和舒适约束条件下，将两类价格序列分别作为控制信号输入，比较其驱动下的削峰量、填谷量、负荷转移率和峰谷差降低率等柔性调控指标。这一比较维度反映的是不同电价信号引导负荷时序响应的能力差异，而非终端结算费用的绝对值高低。

图13表明，交易电价下两类系统的用电集中于低谷期；分时电价下负荷更多分布于高峰期、平谷期。相对于固定的分时电价信号，交易电价因负荷与可再生能源的不确定性，其电价具有较大波动性。

为量化分析电价机制对供暖系统柔性调控效果的影响，将模拟计算结果及柔性量化参数进行统计与计算，结果如下表13所示。分时电价下两类系统的填谷量均为负，说明固定信号可能导致实际运行中火电使用增加；相变散热器和相变墙体的负荷

表11 相变墙体供暖系统模拟计算结果
Table 11 Simulation calculation results of phase change wall heating system

控制策略	高峰期耗电量（kWh）	平谷期耗电量（kWh）	低谷期耗电量（kWh）	总耗电量（kWh）	平均室温（℃）	用电费用（元）
传统比例控制	4.3	5.2	4.1	13.6	20.4	3.15
基于日前电价预测的启发式控制策略	0	0.60	10.9	11.5	19.7	1.59



(a) 比例控制　　(b) 启发式控制

图13　不同控制策略下相变墙体系统典型日运行曲线

Fig.13　Typical daily operation curves of phase change wall system under different control strategies

表12　相变墙体系统启发式控制策略下柔性调控效果

Table 12　Flexible regulation effect of phase change wall system under heuristic control strategy

系统类型	总耗电量（kWh）	削峰量（kWh）	填谷量（kWh）	负荷转移率	峰谷差降低率
相变墙体系统	11.5	4.3	6.8	100%	54.5%

转移率分别为71.8%和86.0%。交易电价下两类系统的峰谷差降低率均为分时电价下的2倍以上，更有利于平抑负荷并促进可再生能源消纳。

本文采用交易电价并非为了据此计算现行政策下建筑用户的实际账单，而是将其作为反映电力供需时序关系的控制信号，用于指导热泵系统的储热与负荷转移控制。

这一设计基于以下考虑：交易电价由集中竞价形成，能够最直接地反映电力供需的时序匹配关系，是当前时序分辨率最高的电价信号。随着电力市场化改革推进，批发侧价格信号通过零售环节向终端用户传导的机制正在建立——售电公司或负荷聚合商可通过动态零售电价或需求响应指令，将批发侧价格信号传递给建筑用户。已有研究验证了热泵通过零售电价响应、需求响应调度等模式参与电网调度的可行性[21]。本文的研究场景即设定于上述未来应用框架下，交易电价作为控制输入的有效性不依赖于当前建筑用户的实际结算电价构成。

4.4　敏感性及不确定性分析讨论

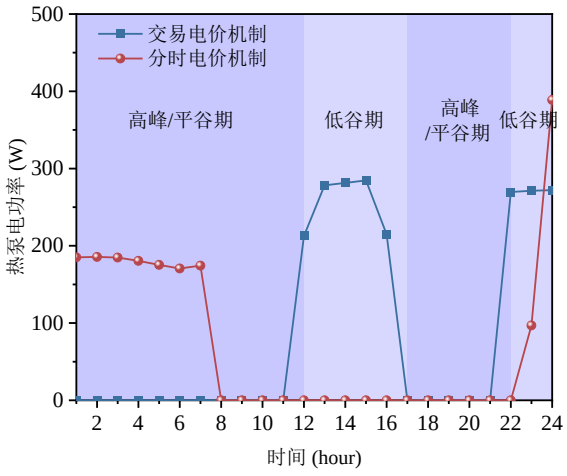
敏感性分析方面，本文对电价参数进行初步敏感性讨论。电价峰谷差的变化不改变本文的核心趋势性结论——即相变散热器系统柔性优于相变墙体系统、启发式控制较比例控制在所有末端类型中均显著降低电费和高峰期负荷。但电价波动幅度会直接影响柔性调控的绝对经济收益：电价峰谷差越大，通过柔性调控可获得的经济性改善越显著[22]。

不确定性分析方面，本文的研究定位是揭示确定性条件下储热方式、控制策略及电价机制对DR调控效果的相对影响规律，因此采用TRNSYS确定性仿真模型，未引入随机参数采样。在分布式热泵系统柔性聚合的实际应用场景中，建筑参数的异质性、人员行为的随机性以及电价信号的波动性构成多重不确定性源。既有研究表明，不确定性主要

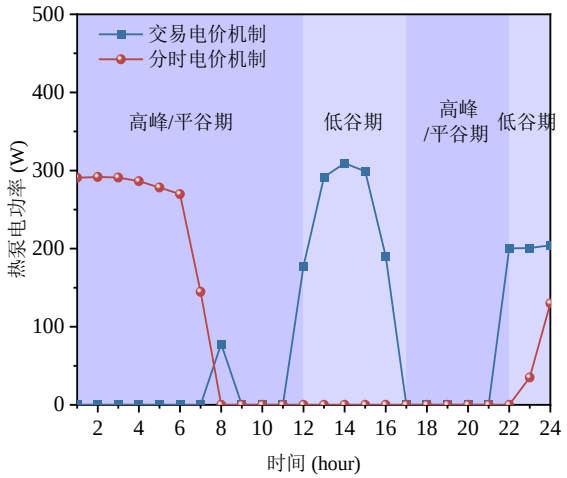
表13　不同电价机制下相变散热器和相变墙体系统柔性调控效果

Table 13　Flexible regulation effect of phase-change radiator and phase change wall systems under different electricity price mechanisms

系统类型	电价机制	总耗电量（kWh）	削峰量（kWh）	填谷量（kWh）	负荷转移率	峰谷差降低率	用电费用（元）
相变散热器系统	交易电价	11.1	3.9	7.4	100%	54.5%	1.59
	分时电价	11.9	2.8	-0.5	71.8%	21.5%	3.78
相变墙体系统	交易电价	11.5	4.3	6.8	100%	54.5%	1.60
	分时电价	12.0	3.7	-0.8	86.0%	23.0%	3.81



(a) 相变散热器



(b) 相变墙体

图13 典型日不同电价机制柔性调控策略下不同供暖系统热泵功率

Fig.13 Heat pump power of different heating systems under flexible regulation strategies of different electricity price mechanisms on typical day

影响灵活性激活的实际运行成本和末端不舒适度风险，但对系统能否可靠激活所承诺的柔性量影响有限[23]。此外，随着样本规模增大，聚合柔性趋于期望值，当参与用户数超过一定阈值时，柔性评估的波动范围显著降低[20]。

5 结论与展望

本文在TRNSYS中建立三类供暖系统，构建日前交易电价预测模型并提出启发式控制策略，仿真比较不同末端、控制策略及电价机制下的运行与柔性。结论如下：

（1）严寒期内，启发式控制使普通散热器、相变散热器和相变墙体系统的总耗电量分别降低29.5%、14.0%和15.4%，电费分别降低65.2%、49.5%和57.3%。相变散热器可将平、峰期用电降至零。

（2）启发式控制下，两类相变系统的负荷转移率均达100%，峰谷差降低率约54.5%，约为普通散热器的2倍。相变散热器与热水、室内空气直接换热，蓄放热效率高，调节灵活性优于相变墙体。

（3）比例控制下，相变材料充分储热后长期保持完全融化，潜热未有效利用；启发式控制可驱动其完成融化—凝固循环，增强系统柔性。

（4）交易电价下两类相变系统均实现100%高峰期负荷转移；分时电价下负荷转移率降至71.8%和86.0%，峰谷差降低率降至21.5%和23.0%，电费约为交易电价下的2.4倍。

需要说明的是，上述定量结论仅适用于本研究设定的北京寒冷地区单房间模型、严寒期典型5 d、18~22℃舒适约束及确定性参数条件。交易电价仅作为日前调度信号，所得耗电量降幅、价格信号加权电能量成本和柔性指标均属于特定仿真边界下的相对结果，不代表其他气候区、建筑类型、设备容量或终端结算场景；跨场景应用需重新校准模型参数并开展实测验证。

后续工作拟将本文启发式控制策略与数据驱动方法结合，提取近优决策规则，在保持低计算成本的同时逼近MPC调控效果，并引入蒙特卡洛模拟或拉丁超立方采样，对关键参数（建筑热容、传热系数、人员行为模式、电价场景）进行概率化建模，建立柔性调控效果的置信区间，为聚合调度提供风险量化依据。

参 考 文 献

[1] Chen F, Zhang WY, Chen R, etal. Adapting carbon neutrality: Tailoring advanced emission strategies for developing countries [J]. Applied Energy, 2024, 361: 122845. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122845.

[2] 供热碳中和迈出第一步"中国北方供热节能减碳潜力、路径与对策研究"课题启动会召开[C]. 北京: 清华大学建筑节能中心, 2021-2-5. First step towards carbon neutrality in heating: Kick-off meeting of the research project "Research on potential, paths and countermeasures for energy saving and carbon reduction of heating in northern China" [C]. Beijing: Building Energy Conservation Center, Tsinghua University, 2021-02-05.

[3] Cai HM, Ziras C, You S, et al. Demand side management in urban district heating networks[J]. Applied Energy, 2018, 230: 506-518. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.08.105.

[4] Foteinaki K, Li RL, Péan T, et al. Evaluation of energy flexibility of low energy residential buildings connected to district heating[J]. Energy and Buildings, 2020, 213: 109804. DOI: 10.1016/j. enbuild. 2020.109804.

[5] Song MJ, Niu FX, Mao N, et al. Review on building energy performance improvement using phase change materials[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 776-793. DOI: 10.1016/j. enbuild. 2017.10.066.

[6] Drissi S, Ling T, Mo KH, Eddhahak A. A review of microencapsulated and composite phase change materials: Alteration of strength and thermal properties of cement-based materials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 110: 467-484. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.072.

[7] Abass PJ, Muthulingam S. Incorporation of phase change materials into building materials and envelopes for thermal comfort and energy optimization: A comprehensive review[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 103: 112106. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112106.

[8] Dengiz T, Jochem P, Fichtner W. Demand response with heuristic control strategies for modulating heat pumps[J]. Applied Energy, 2019, 238: 1346-1360. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.12.008.

[9] Rodríguez LR, Brennenstuhl M, Yadack M, et al. Heuristic optimization of clusters of heat pumps: A simulation and case study of residential frequency reserve[J]. Applied Energy, 2019, 233: 943-958. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.103.

[10] Wang PC, Liu ZB, Liu RM, et al. Energy flexibility of PCM-integrated building: Combination parameters design and operation control in multi-objective optimization considering different stakeholders[J]. Energy, 2023, 268: 126753. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126753.

[11] Gholamibozanjani G, Farid M. Application of an active PCM storage system into a building for heating/cooling load reduction [J]. Energy, 2020, 210: 118572. DOI: 10.1016/j. energy. 2020.118572.

[12] Wan H, Gong YY, Dang CY, et al. Power control of latent heat thermal energy storage units using a model-based predictive strategy[J]. Applied Energy, 2025, 382: 125220. DOI: 10.1016/j. apenergy.2024.125220.

[13] DOU Y Z, XU B P, JIANG P H, et al. A dual-layer modelling method for characterizing and optimizing the energy flexibility of building heating systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 271: 126312.

[14] ASCHIDAMINI G L, PAVLOVIC M, REINHOLZ B A, et al. Comprehensive review on the control of heat pumps for energy flexibility in distribution networks[J]. IEEE Access, 2025, 13: 85927-85950.

[15] PEAN T Q, SALOM J, COSTA-CASTELLO R. Review of control strategies for improving the energy flexibility provided by heat pump systems in buildings[J]. Journal of Process Control, 2019, 74: 35-49.

[16] ZHU J, TIAN Z, NIU J, et al. Machine learning-enhanced lightweight rule-based control strategy for building energy demand response[J]. Building Simulation, 2025, 18(7): 1857-1876.

[17] XU B P, JIANG P H, CHEN Z, et al. An integrated simulation of intermittent heating of multi-zone buildings by heat-pump heating systems with different terminal types [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235: 121427.

[18] XU B P, ZHANG H R, DOU Y Z, et al. Numerical study on thermal storage-discharge process of envelopes in building heating systems with different terminals [C]. Proceedings of the ASME 2024, Nottingham, UK, August 5-7, 2024.

[19] XU N J, CHU W J, TANG S M, et al. Assessing the flexibility of district heating systems via dynamic simulation of building and network thermal inertia [C]. Proceedings of the BAS 2026, Hongkong SAR, China, June 11-13, 2026.

[20] LI Z J, DOU Y Z, LI Q G, et al. Quantifying the flexibility of centralized hot water systems at a university campus by considering demand response participation uncertainty [J]. Energies, 2026, 19: 3826.

[21] SPERBER E, SCHIMECZEK C, FREY U, et al. Aligning heat pump operation with market signals: A win-win scenario for the electricity market and its actors [J]. Energy Reports, 2025, 13: 491-513.

[22] MASHERBAUER P, ORTMANN P, OLIVA A, et al. Flexibility by implementation of heat pumps in multi-vector energy systems and thermal networks [R]. IEA Heat Pumping Technologies Annex 57, Jan, 2024.

[23] ROUSSEAU J, CAI H, HEER P, et al. Uncertainty-aware flexibility of HVAC systems in buildings: from quantification to provision[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2026, 17(1): 269-282.