



计及管网与建筑虚拟储能的综合能源系统MPC滚动优化调度

沈昊天¹, 徐玉杰^{1,2,3*}, 周学志^{1,2,3}, 刘 猛⁴, 朱轶林^{2,3}, 陈海生^{1,2,3}

(¹中科南京未来能源系统研究院, 江苏 南京 211135; ²中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; ³中国科学院大学, 北京 100006; ⁴中国标准化研究院, 北京 100191)

摘要: 针对综合能源系统供热侧源荷时序不匹配、热力管网动态特性利用不足以及建筑热惯性难以主动参与调度的问题, 本文提出一种计及管网与建筑虚拟储能显式调度的MPC-MILP滚动优化方法。构建包含热电联产机组、燃气锅炉、电热泵、太阳能集热器、实体储热、5.0 km供热管网及工业厂房、住宅小区、商业楼宇三类建筑热用户的源-网-荷-储系统; 采用有限差分PDE描述管网传输延迟与沿程散热, 采用双节点RC模型描述建筑室温与墙体温度动态。在热平衡中引入管网和建筑虚拟储能等效充放热功率, 并将其调用量反馈至供水温度扰动和建筑实际得热量, 使虚拟储能调度与物理热状态形成闭环。算例结果表明, 系统热负荷满足率达到100%, 总运行成本为65441.2元; 虚拟储能最大放热功率为369.0 kW, 最大充热功率为1000.0 kW, 峰段平均放热194.9 kW, 谷段平均充热603.1 kW。按日内实际调用量统计, TES实体储能、管网虚拟储能和建筑虚拟储能分别为1130.6、1940.7和6058.1 kWh, 三类建筑室温均处于舒适边界内。等效折算结果表明, 利用管网与建筑热惯性可减少约4770.2 kWh新增实体TES等效配置需求, 并形成约217.0万元的潜在初投资节约。结果验证了两类热惯性资源作为受约束虚拟储能参与MPC调度的可行性、数值可靠性与工程经济价值。

关键词: 综合能源系统; 热力管网; 建筑热惯性; 虚拟储能; 模型预测控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0731

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-12

MPC Rolling Optimal Dispatch of Integrated Energy System Considering Pipeline and Building Virtual Energy Storage

Shen Haotian¹, Xu Yujie^{1,2,3*}, Zhou Xuezhi^{1,2,3}, Liu Meng⁴, Zhu Yilin^{2,3}, Chen Haisheng^{1,2,3}

(¹Nanjing Institute of Future Energy System, Nanjing 211135, Jiangsu, China; ²Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100006, China; ⁴China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)

Abstract: To address the temporal mismatch between heat supply and demand, insufficient utilization of district-heating-network dynamics, and the difficulty of actively incorporating building thermal inertia into dispatch, this paper proposes an MPC-MILP rolling optimization method with explicit scheduling of pipeline and building virtual energy storage. A source-network-load-storage integrated energy system is established, including combined heat and power units, gas boilers, electric heat pumps, solar collectors, physical thermal energy

收稿日期: 2026-08-24; 修改稿日期: 2026-09-30。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0612001); 国家重点研发计划项目 (2022YFB2405201); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (117GJHZ2023009MI); 中国科学院战略性先导科技专项资助 (XDC0190000); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项重大创新载体建设项目 (BM2022001)。

第一作者: 沈昊天 (1995—), 男, 硕士, 工程师, 储能与综合力系统研究方向, E-mail: shenhaotian@njiet.cn; 通信作者: 徐玉杰, 研究员, 压缩空气储能与分布式能源系统研究方向, E-mail: xuyujie@njiet.cn。

引用本文: 沈昊天, 徐玉杰, 周学志, 等. 计及管网与建筑虚拟储能的综合能源系统MPC滚动优化调度[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.

Citation: Shen Haotian, Xu Yujie, Zhou Xuezhi, et al. MPC Rolling Optimal Dispatch of Integrated Energy System Considering Pipeline and Building Virtual Energy Storage[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

storage, a 5.0 km district heating pipeline, and three types of heat users: industrial buildings, residential communities, and commercial buildings. A finite-difference PDE model is used to describe pipeline transmission delay and heat loss, while a two-node RC model is adopted to characterize indoor and wall temperature dynamics. Equivalent charging and discharging powers of pipeline and building virtual energy storage are introduced into the heat balance and fed back to the physical thermal states. Case results show that the heat-load satisfaction rate reaches 100%, and the total operating cost is 65441.2 yuan. The maximum virtual discharging and charging powers are 369.0 kW and 1000.0 kW, respectively, with an average discharging power of 194.9 kW during peak periods and an average charging power of 603.1 kW during valley periods. In terms of actual daily utilization, the physical TES, pipeline virtual energy storage, and building virtual energy storage are 1130.6, 1940.7, and 6058.1 kWh, respectively, while all indoor temperatures remain within comfort limits. Equivalent conversion indicates that, under the assumed investment parameters, using pipeline and building thermal inertia can reduce the equivalent demand for newly installed physical TES by about 4770.2 kWh and provide a potential initial-investment saving of about 2.17 million yuan. The results verify the feasibility, numerical reliability, and engineering economic value of incorporating these two thermal inertia resources as constrained virtual energy storage in MPC-based heat dispatch

Keywords: Integrated energy system; District heating network; Building thermal inertia; Virtual energy storage; Model predictive control

1 绪 论

在“双碳”目标和新型能源体系建设背景下,电、气、热等多能载体的协同运行成为提升能源利用效率、促进可再生能源消纳的重要途径。与电力系统相比,供热系统具有显著的热惯性和时间尺度差异:热量在管网中的传输存在分钟至小时级延迟,建筑围护结构和室内空气又能够在舒适温度允许范围内暂存或释放热量^[1]。因此,热力系统并非仅是刚性的负荷通道,而是具备可调节能力的分布式储能资源。此类依托系统自身热容和动态特性形成、无需额外配置专用储能装置即可实现能量存储与释放的调节能力,通常被称为虚拟储能(Virtual Energy Storage, VES),其本质是通过时间维度上的能量转移实现对供需关系的灵活调节^[2]。与虚拟储能不同,实体储热装置(Thermal Energy Storage, TES)则通过水箱、蓄热罐或相变储热单元等物理设备实现热量的显式存储与释放,是供热系统中提升运行灵活性和削峰填谷能力的重要手段,但其配置通常伴随额外投资、占地需求及运行维护成本。

围绕实体储热与虚拟储能资源的协同利用,国内外学者在综合能源系统优化调度与灵活性挖掘方面开展了大量研究。苏娟等^[3]针对综合能源系统下虚拟储能建模方法与应用场景进行了系统综述,指出可将源、网、荷侧可调资源按储能化思想参与综合能源系统优化调度,为虚拟储能统一建模提供了理论基础。刘东林等^[4]针对建筑综合能源系统,提出考虑建筑虚拟储能的双层优化调度策略,将建筑供冷、供热系统热惯性及冷热负荷柔性纳入主从博弈调度框架,有效提高了系统经济性与低碳性。这些工作拓展了综合能源系统的调度内涵,但多数研究采用稳态热平衡简化,将热负荷视为即时刚性需求,忽略了管网传输延迟和建筑热惯性对调度时序的深刻影响。

管网与建筑所蕴含的热惯性是供热系统区别于电力系统的核心物理特性,近年来已有学者将其等效为虚拟储能纳入调度研究。在管网动态特性方面,张涛等^[5]建立了计及气-热虚拟储能特性的综合能源系统日前优化调度模型,通过供热管道流量分段建模和气网约束线性化,验证了气-热网络虚拟储能对提升系统灵活性、经济性和新能源消纳能力

的作用；展浩等^[9]面向分时电价场景开展供热管网储能优化与实证分析，将一次管网和换热站等效为分布式储热单元，证明供热管网储热能力可支撑峰平时段停机运行并获得显著经济收益。王欣等^[7]以CHP机组为热源建立区域供热系统模型，提出基于安全强化学习的经济调度策略，表明有效利用供热管道热惯性能够提升CHP机组运行经济性。在建筑热惯性方面，Håkansson等^[8]研究了需求侧经济型MPC引入区域供热网络后的影响，指出通过经济信号引导建筑侧热负荷时移，可利用建筑热惯性实现削峰与运行优化；Guo等^[9]提出考虑群控水力平衡模型的Informer-MPC框架，提高了用户侧热负荷控制精度；Wei等^[10]针对区域供热网络中的季节性热化学储能系统开展MPC优化研究，验证了储热系统与供热网络协同控制在削峰填谷和提升运行灵活性方面的有效性。上述研究逐步揭示了管网与建筑虚拟储能的调节价值，但现有工作多聚焦于低温热网或单一类型虚拟储能，缺乏在中国北方高温供热场景下同时建立管网PDE动态模型与建筑双节点RC模型并在统一MILP框架内量化两类虚拟储能实际调用量及其对源侧等效热需求影响的系统性研究。

模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）凭借滚动优化、反馈修正和多约束处理能力，成为供热系统动态调度的重要方法。针对含TES与柔性负荷的供热系统，Xin等^[11]提出基于MPC的太阳能区域供热系统日前运行调节方法，通过预测太阳辐照、热负荷及储热状态优化集热、储热与供热过程，验证了MPC在提升太阳能利用率和降低运行能耗方面的优势；Liu等^[12]针对主动-被动复合太阳能供热系统，提出日前优化与实时控制相结合的运行优化方法，在考虑建筑蓄热、太阳能供热和辅助热源协同的基础上，实现了系统运行能耗和舒适性的综合优化。然而，现有MPC研究多聚焦于单一柔性资源（仅TES或仅建筑热惯性），较少将CHP、燃气锅炉、热泵、太阳能集热器、TES与管网-建筑双重虚拟储能耦合在同一滚动优化框架内，也鲜有工作在严格MILP意义上量化多层次虚拟储能能力之间的对比关系。

针对上述不足，本文开展以下研究工作：构建包含CHP、燃气锅炉、热泵、太阳能集热器、TES、供热管网和三类建筑热用户的综合能源供热

系统统一框架，实现源-网-荷-储协同建模；建立以综合运行成本最小为目标的MPC-MILP滚动优化模型，并将管网与建筑虚拟储能等效充放热功率显式纳入热功率平衡；采用一维对流-散热PDE有限差分法刻画管网温度动态传播，采用双节点RC等效热网络刻画建筑室温与墙温动态，并通过供水温度扰动和建筑实际得热量修正实现虚拟储能调用量对物理状态的反馈；进一步设置无虚拟储能、仅管网虚拟储能、仅建筑虚拟储能及双虚拟储能等对照工况，并开展预测时域与管网空间离散敏感性分析，从调度效果、数值稳定性、能量守恒和等效TES替代需求等方面验证方法可靠性。

2 综合能源系统结构与运行策略

2.1 系统组成

如图1所示，本文研究对象为典型供热型综合能源系统，由源侧供热设备、实体储热、热力管网和建筑热用户共同构成。源侧包括两台热电联产机组（CHP1、CHP2）、两台燃气锅炉（GB1、GB2）、电热泵（HP）和太阳能集热器（SC）。其中，CHP承担基础热电联供任务并通过售电收益影响运行经济性；GB作为峰值时段的快速补充热源；HP受分时电价和COP约束提供电-热转换；SC作为日间清洁热源优先消纳。实体储热装置TES通过SOC约束实现显式热量跨时段转移。热力管网连接源侧与用户侧，其水体热容量、沿程散热和传输时滞使源侧供热变化不会瞬时到达用户端，由此形成管网虚拟储能。负荷侧包括工业厂房、住宅小区和商业楼宇三类建筑，其室内空气和围护结构热容可在舒适温度边界内吸收或释放热量，形成建筑虚拟储能。本文将上述设备调节能力、TES实体储能和两类虚拟储能统一纳入MPC滚动优化框架，使源-网-荷-储多层柔性在同一热平衡约束下协同发挥作用。

2.2 运行策略

系统以15 min为一个控制周期，每个控制周期根据当前TES SOC、上一时刻设备出力、管网温度场及建筑室温状态建立MPC优化模型，预测时域设置为4步（1 h）。优化器在满足热平衡及设备运行约束的基础上，联合优化各供热设备出力、TES充放热功率以及管网和建筑虚拟储能的等效充放热功率。求解得到未来1 h的最优控制序列后，

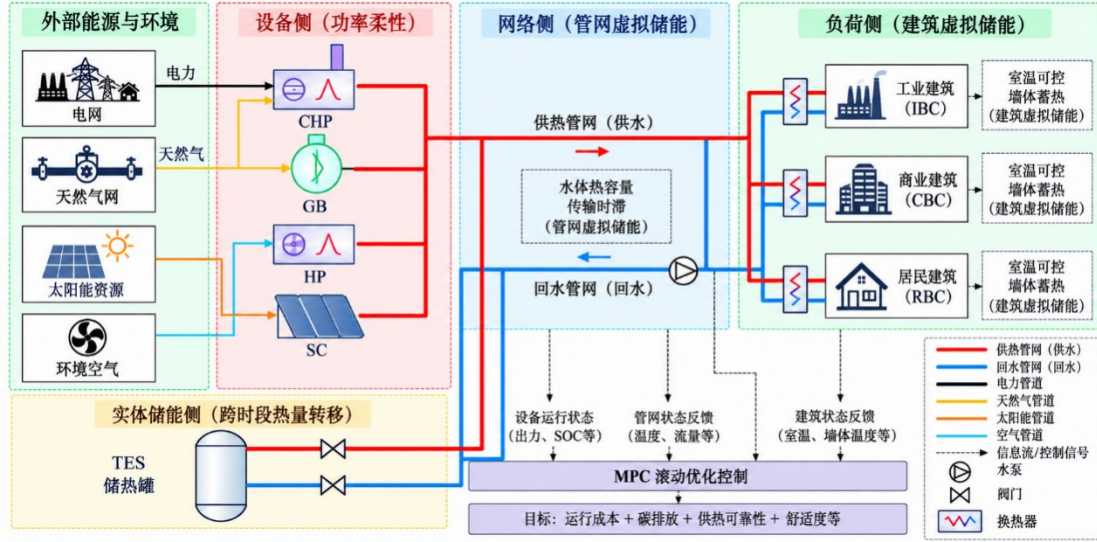


图1 计及管网与建筑虚拟储能的综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of the integrated energy system considering pipeline and building virtual energy storage

仅执行当前时刻的第一步控制量，并更新TES、管网及建筑热状态，随后进入下一控制周期重新优化。需要说明的是，管网温度场和建筑热状态在每一轮执行后均反馈至下一轮MPC初始状态，因此

当前控制量对末端负荷的滞后影响可通过滚动反馈持续进入后续优化过程。

2.3 主要设备与模型参数

表1 主要设备与热力系统参数

类别	参数	数值	说明
时间	调度步长/预测时域	15min / 1 h	24 h 共 96 步
CHP	热功率上限	4000/3000 kW	热效率 0.45/0.44
GB	热功率上限	2500/1500 kW	效率 0.92/0.90
HP	热功率上限/COP	1200 kW / 3.5	分时电价驱动
SC	集热面积/效率	2000 m ² / 0.65	不可控清洁热源
TES	容量/功率	6000 kWh / 1500 kW	SOC 范围 0.10~0.90
管网	长度/流速/内径	5000 m / 1.2 m·s ⁻¹ / 0.3 m	50 个空间节点
建筑	室内热容	1500/1000/800 kWh·°C ⁻¹	工业/住宅/商业

3 综合能源系统动态建模

3.1 设备能量转换模型

CHP 机组以热功率为主要调度变量，其发电功率由热电效率比确定。设第 i 台 CHP 的热功率为 $P_{CHP,i}^{th}$ ，电效率和热效率分别为 η_i^e 和 η_i^h ，则：

$$P_{CHP,i}^e(t) = P_{CHP,i}^{th}(t) \cdot \eta_i^e / \eta_i^h \quad (1)$$

燃气锅炉燃气消耗与其供热量及热效率相关；热泵耗电功率由供热功率与 COP 确定；太阳能集热器出力由集热面积、效率和太阳辐照度决定：

$$F_{GB,i}(t) = P_{GB,i}^{th}(t) / [\eta_{GB,i} \cdot LHV_{gas}] \quad (2)$$

$$P_{HP}^e(t) = P_{HP}^{th}(t) / COP \quad (3)$$

$$P_{sc}^{th}(t) = A_{sc} \cdot \eta_{sc} \cdot G(t) / 1000 \quad (4)$$

3.2 TES 实体储能模型

TES 采用能量状态 SOC 描述。考虑充放热效率和自损耗，状态递推关系为：

$$SOC(t+1) = [SOC(t) + \eta_{ch} P_{ch}(t) \Delta t / E_{TES} - P_{dis}(t) \Delta t / (\eta_{dis} E_{TES})] (1 - \lambda \Delta t) \quad (5)$$

充热和放热状态通过 0—1 变量互斥，避免同一时段同时充放：

$$0 \leq P_{ch}(t) \leq \delta_{ch}(t) P_{max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq \delta_{dis}(t) P_{max}$$

$$\delta_{ch}(t) + \delta_{dis}(t) \leq 1$$

3.3 供热管网PDE与虚拟储能模型

管网沿程温度受流体对流输运和向土壤散热共同影响[13]。忽略径向温度梯度后，一维温度场可表示为：

$$\partial T(x,t)/\partial t + v\partial T(x,t)/\partial x = -[U_{line}/(\rho c_p A)] \cdot [T(x,t) - T_{soil}] \quad (7)$$

本文将管道离散为50个空间节点，并采用显式迎风有限差分格式求解。需要说明的是，PDE并非直接以15 min调度步长积分，而是在每个MPC控制周期内采用30 s内部积分步长并循环30次完成温度场更新，以保证管网对流输运过程在调度步长内得到充分刻画。离散格式的Courant数、网格敏感性和温度场计算可靠性在算例分析部分进一步校验。离散后第*i*个节点温度更新为：

$$T_i^{n+1} = T_i^n - \frac{v\Delta t}{\Delta x} (T_i^n - T_{i-1}^n) - \beta (T_i^n - T_{soil}) \quad (8)$$

式(8)中 β 为管道离散散热系数，由连续模型中的沿程散热项离散得到，取 $\beta = U_{line} \Delta t / (\rho c_p A)$ ；其中 U_{line} 为管道单位长度综合换热系数， ρ 为水密度， C_p 为定压比热容， A 为管道截面积， Δt 为PDE内部积分步长，因此 β 表征单个内部积分步长内管道水体向土壤散热的无量纲衰减强度。管网虚拟储能以管内水体平均温度相对于参考温度的等效热量表征，其储能状态由管网水体质量、定压比热和平均温度偏差共同决定。虚拟储能净功率定义为相邻时段等效储能的变化率，正值表示释放热量并降低源侧等效需求，负值表示吸收热量并提高源侧等效需求。与单纯后处理不同，本文进一步将管网虚拟储能调用量折算为供水温度扰动并反馈至PDE递推。由此，虚拟储能的可用容量和功率边界由管网温度余量和恢复约束共同决定，避免出现脱离物理状态的重复计量或自由放热。管网虚拟储能容量和净功率定义如下：

$$E_{pipe}(t) = \rho c_p A L [T_{pipe}(t) - T_{ref}] / 3.6 \times 10^6 \quad (9)$$

$$P_{pipe}(t) = [E_{pipe}(t) - E_{pipe}(t+1)] / \Delta t$$

其中分母 3.6×10^6 用于将J换算为kWh。管网理论热传输延迟由管长与流速决定，即 $\tau = L/v$ 。本算例中 $\tau = 1.157$ h，意味着热源侧温度和功率变化需经过约1 h才完整传递至用户侧。

3.4 建筑双节点RC与虚拟储能模型

三类建筑均采用室内空气—墙体双节点RC模型[14]。室内节点接收供热量并与墙体换热，墙体

节点进一步与室外环境换热。其动态方程为：

$$C_{in} dT_{in}/dt = Q_{bld} - (T_{in} - T_{wall})/R_{wall} \quad (10)$$

$$C_{wall} dT_{wall}/dt = (T_{in} - T_{wall})/R_{wall} - (T_{wall} - T_{out})/R_{out}$$

当室温高于设定温度时，末端调节阀按温度偏差降低供热量；建筑虚拟储能由室温和墙温相对于基准状态的等效热量共同构成。建筑虚拟储能放热时，建筑以自身热惯性补偿部分热需求，在RC模型中表现为实际到达建筑的供热量减少；建筑虚拟储能充热时，额外供热量被吸收并存入建筑围护结构。三类建筑虚拟储能调用量按室内热容比例分配，并受到舒适温度边界和安全裕度限制。建筑虚拟储能状态由室内空气和围护结构热状态偏移共同表征，其虚拟储能容量和净功率定义如下：

$$E_{bld}(t) = C_{in} [T_{in}(t) - T_{set}] + C_{wall} [T_{wall}(t) - (T_{set} - T_{ref})] \quad (11)$$

$$P_{bld}(t) = [E_{bld}(t) - E_{bld}(t+1)] / \Delta t$$

工业厂房、住宅小区和商业楼宇的室内热容分别为1500、1000和800 kWh/°C。热容越大，室温对短时供热波动越迟钝，温度曲线越平滑；热容越小，室温响应越灵敏，能够在较短时间内形成更明显的温度偏移。

4 MPC-MILP滚动优化调度模型

4.1 目标函数

目标函数综合考虑CHP和GB燃气费用、HP用电费用、CHP售电收益、设备运维费用。

$$\min J = \sum_i (C_{fuel, CHP} + C_{fuel, GB} + C_{elec, HP} - R_{sell, CHP} + C_{om}) \quad (12)$$

4.2 约束条件

热母线功率平衡约束在常规设备和TES基础上进一步引入管网、建筑虚拟储能等效功率：

$$Q_{eff} = Q_{load} - P_{pipe} - P_{bld}$$

$$\sum_i P_{CHP, i}^{th} + \sum_i P_{GB, i}^{th} + P_{HP}^{th} + P_{SC}^{th} + P_{dis} - P_{ch} = Q_{eff} \quad (13)$$

本文将原始用户侧热负荷记为 Q_{load} ，经管网和建筑虚拟储能修正后的源侧等效热需求记为 Q_{eff} 。因此，式(13)中的热负荷为源侧设备实际跟踪的等效热需求。

此外，模型还包括各设备出力上下限、相邻时刻爬坡约束、TES SOC边界、充放互斥、管网虚拟储能功率上限、建筑舒适温度边界、虚拟储能削峰填谷方向约束和预测末端安全下界约束，防止虚拟储能被持续掏空并退化为不受恢复约束的主力热源。由于TES运行状态包含整数变量，整体问题构成混合整数线性规划，并采用YALMIP调用

CPLEX 逐步求解。

4.3 MPC 滚动求解流程

在每个控制周期，首先读取当前 SOC、上一时刻设备出力、管网温度场和建筑热状态；其次结合当前负荷、气象和分时电价构建优化模型并求解；然后执行当前步控制指令，更新 TES 状态，并

将管网虚拟储能调用量折算为供水温度扰动、将建筑虚拟储能调用量折算为实际到达建筑的热量修正；最后进入下一时刻重复上述过程。滚动更新机制使虚拟储能的可调用上限由真实物理状态逐步反馈决定，避免出现脱离管网和建筑状态的自由调节量。

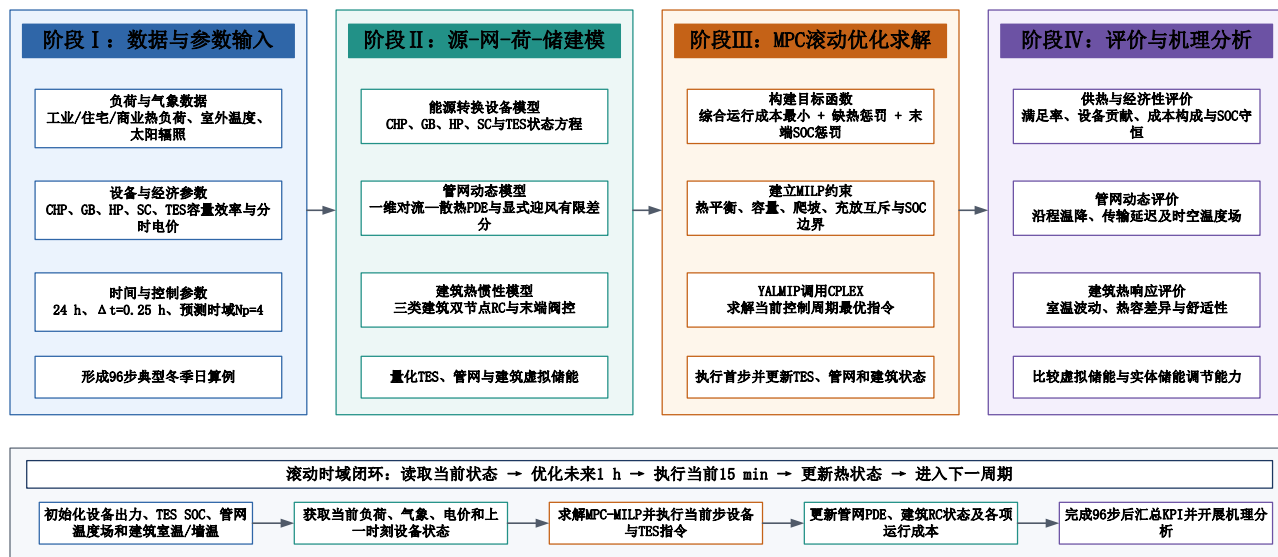


图2 计及管网与建筑虚拟储能的 MPC 滚动优化研究方法

Fig. 2 MPC rolling optimization methodology considering pipeline and building virtual energy storage

5 算例设置与结果分析

5.1 负荷与气象条件

图3显示，总热负荷在4979~8479 kW之间变化，全天热需求为156.6 MWh。住宅负荷是主要需求来源，并在清晨形成较高供暖需求；工业负荷在8:00后因白班生产明显抬升；商业负荷在7:00后快速增加，并在午间和17:00~20:00形成高负荷平台。三类负荷时序叠加使原始总热负荷峰值出现在19:00。考虑虚拟储能调节后，等效源侧需求峰值降至8279 kW，谷值为4996 kW，说明管网和建筑虚拟储能主要承担对源侧需求曲线的局部修正，而非替代常规热源承担基础供热。

5.2 源侧设备与 TES 滚动调度结果

如图5所示，两台 CHP 承担系统基础供热任务并连续运行。CHP1 出力范围为2300~4000 kW，全天供热87.5 MWh，占总热负荷的55.9%；CHP2 供热39.0 MWh，占24.9%。在8:00以后及17:00~21:00 负荷上升时，CHP 出力逐步爬升，其

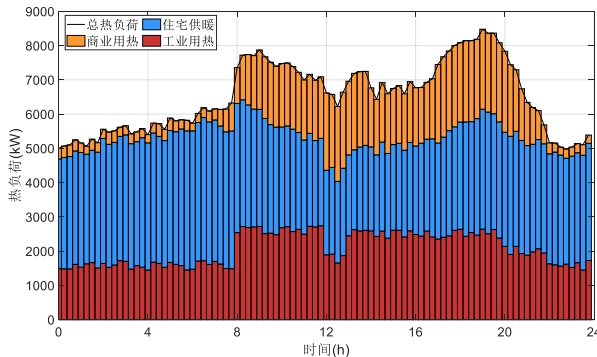


图3 三类建筑热负荷需求分解

Fig. 3 Decomposition of heat-load demand for three building types

中 CHP1 多次达到4000 kW 上限，说明其仍是系统的核心经济热源。图6表明，热泵全天保持运行，供热量为28.1 MWh，占18.0%；GB1 和 GB2 分别供热3.4 MWh 和0.3 MWh，主要在峰值时段补充出力。

图7显示，TES 在低谷与部分负荷较低时段充热，在早晚高峰放热。全天 TES 充热约860.0

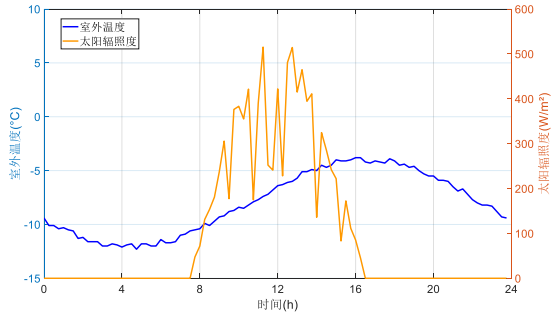


图4 典型冬季日室外温度与太阳辐照度

Fig. 4 Outdoor temperature and solar irradiance on a typical winter day

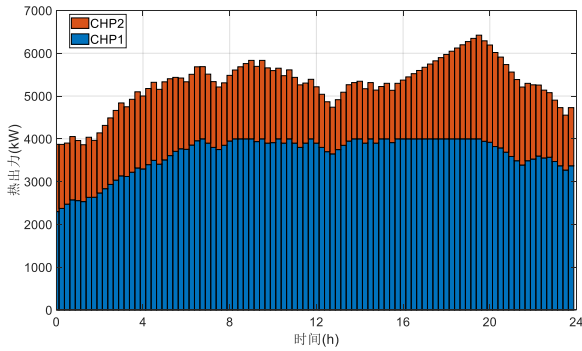


图5 CHP热出力滚动优化结果

Fig. 5 Rolling optimal thermal output of CHP

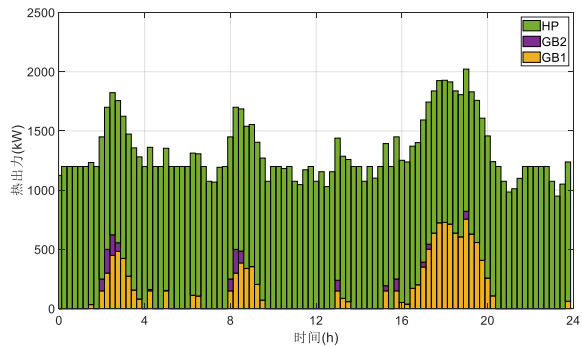


图6 GB与HP热出力滚动优化结果

Fig. 6 Rolling optimal thermal output of GB and HP

kWh、放热约 270.6 kWh，按充放热吞吐量统计的日内实际调用量约为 1130.6 kWh。SOC 在 0.49~0.53 之间运行。由于管网和建筑虚拟储能已承担部分峰谷间需求修正，TES 更多发挥短时平衡和备用调节作用，因此其实际调用强度低于额定容量。

图8从系统层面验证了热平衡关系。CHP 构成供热主体，HP 提供稳定补充，GB 在峰值时段抬升，太阳能 SC 在日间可以抵消一部分常规热源输出；TES 充热以负功率形式吸收热量，放热则弥补供热缺口。与原始热负荷相比，MPC 实际跟踪的

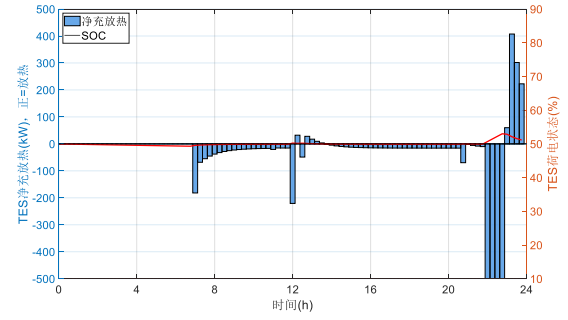


图7 TES净充放热功率与SOC变化

Fig. 7 TES charging/discharging power and SOC

是考虑管网和建筑虚拟储能后的等效源侧需求。仿真中最大缺热量为0，热负荷满足率达到100%，说明设备容量、爬坡约束、TES 和虚拟储能之间实现了可行协调。

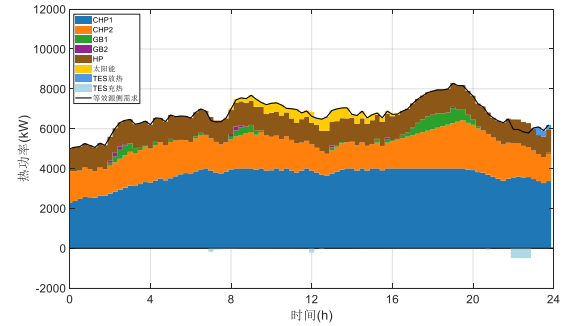


图8 各热源出力与热负荷平衡

Fig. 8 Heat-source output and heat-load balance

5.3 虚拟储能显式调度与等效源侧需求

图9给出了原始总热负荷与计及虚拟储能后的等效源侧需求对比。等效源侧需求由原始负荷扣除管网和建筑虚拟储能净放热贡献得到，因此两条曲线之间的差值即为虚拟储能对源侧热功率的修正量。结果显示，原始负荷峰值为 8479 kW，出现在 19:00；等效源侧需求峰值降至 8279 kW，说明晚高峰时段虚拟储能提供了约 200 kW 的削峰作用。低谷时段等效源侧需求高于原始负荷，反映管网和建筑在低负荷时段吸收额外热量，实现热状态恢复。图9还表明，虚拟储能并未被作为主力热源长期放热，而是呈现受约束的削峰填谷特征。峰段虚拟储能平均净功率为 194.9 kW，谷段平均净功率为 -603.1 kW，平段平均净功率为 -50.3 kW；最大放热功率为 369.0 kW，最大充热功率为 1000 kW。该功率水平仅占系统峰值负荷的一小部分，符合管网与建筑热惯性作为辅助调节资源的定位，也避免

了将虚拟储能解释为可替代常规热源的大功率供热单元。

图 10 进一步分解了管网和建筑两类虚拟储能的净功率贡献。管网虚拟储能日净能量为 1704.9 kWh, 主要体现管网水体温度场和传输延迟带来的小时级热量迁移; 建筑虚拟储能日净能量为 -5925.9 kWh, 说明建筑侧在低谷时段以吸热恢复为主, 并在峰段提供有限放热支撑。两类虚拟储能的时间尺度和物理载体上具有互补性: 管网侧更适合平滑供水温度扰动, 建筑侧则依托舒适区间内的室温和墙温变化提供分布式柔性。由于模型设置了功率上限、舒适安全裕度、削峰填谷方向约束和预测末端安全下界惩罚, 图 10 中的虚拟储能功率保持在合理范围内。

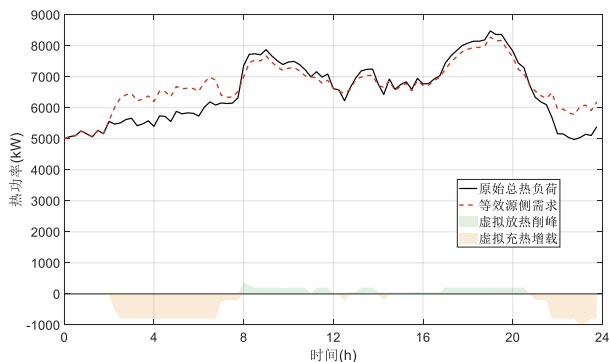


图 9 原始总热负荷与等效后的总热负荷

Fig.9 Original total heat load and equivalent total heat load

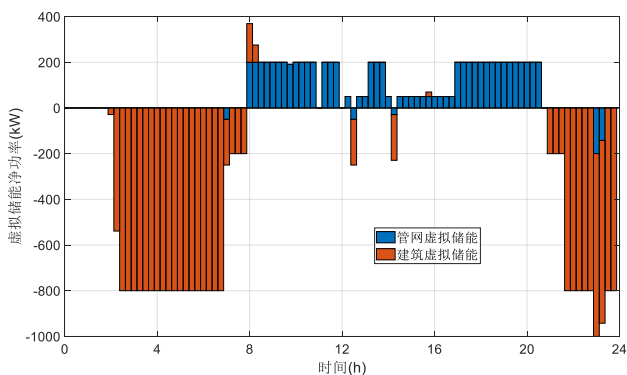


图 10 管网和建筑两类虚拟储能的净功率

Fig.10 Net power of virtual energy storage systems in pipelines and buildings

5.4 热力管网动态特性与虚拟储能

图 11 给出了管道入口、中间截面和出口温度的日内变化。三条曲线呈现明显的先后响应关系: 入口温度直接受源侧供热和管网虚拟储能调度影

响, 中间截面与出口温度则随水流输运逐步滞后。入口平均温度为 65.9℃, 出口平均温度为 63.8℃, 平均沿程温降为 2.1℃。进一步看, 去除初始温度场影响后, 入口温度有效波动范围约为 5.2℃, 出口温度有效波动范围约为 4.8℃, 说明温度扰动在输运过程中存在一定衰减; 入口温度峰值出现在 19:00 左右, 而出口温度峰值约出现在 20:00, 二者相差约 1 h, 与管网理论传输延迟较为吻合。入口温度波动在向下游传播过程中被削弱, 说明管网既存在热损失, 也具备一定的动态蓄热和平滑作用 [15]。这一结果为后续将管网视作虚拟储能提供了物理依据。

图 12 从典型时刻沿程温度分布角度展示管网空间温度梯度。6:00、12:00 和 18:00 时刻的温度曲线总体沿管道长度方向下降, 反映供热管道与土壤之间的散热损失; 不同时刻曲线整体水平不同, 则对应源侧供热强度、虚拟储能充放热状态和管内既有高温水团位置的差异。具体而言, 6:00、12:00 和 18:00 对应的入口—出口温降分别为 1.8、1.3 和 3.0℃, 其中 18:00 温降最大, 约为 12:00 的 2.3 倍, 表明晚高峰供热抬升阶段管道内温度梯度更明显, 管网蓄热和输运滞后效应更强^[16]。与仅观察入口或出口温度相比, 沿程快照能够更清晰地说明热量并非瞬时传递, 而是在管道空间内以温度波形式推进。

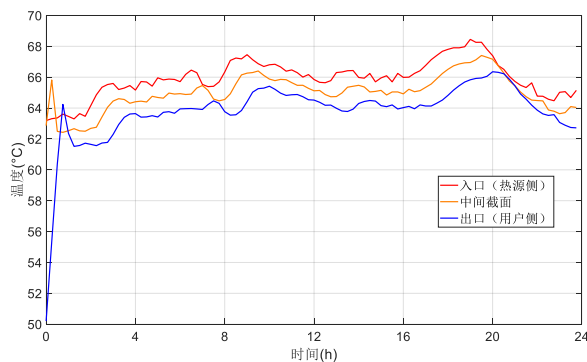


图 11 管道入口、中间截面与出口温度

Fig. 11 Pipeline inlet, middle section, and outlet temperature

图 13 以时空温度场直观展示高温水团由入口向出口传播的过程。8:00 后和 18:00 后的高温区域沿管长方向倾斜推进, 说明温度扰动并非瞬时到达用户侧; 颜色梯度同时体现沿程散热、动态蓄热和虚拟储能调用后的温度场恢复过程。该图验证了采

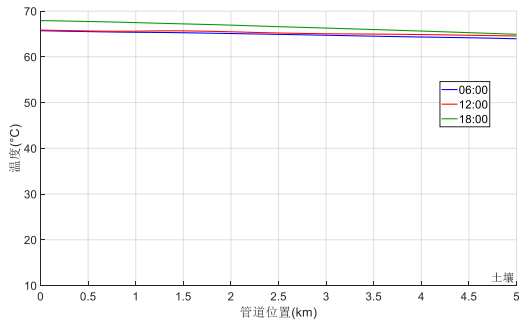


图12 典型时刻管道沿程温度分布

Fig. 12 Temperature distribution along pipeline at typical times

用PDE模型相较稳态热平衡模型能够保留更多网络动态信息。

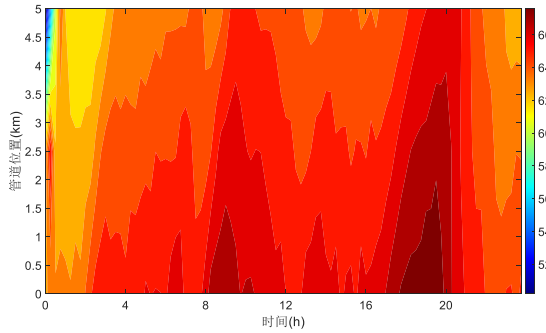


图13 管道时空温度场

Fig. 13 Spatiotemporal temperature field of the pipeline

5.5 建筑热惯性与虚拟储能

工业厂房室内热容为 $1500 \text{ kWh/}^\circ\text{C}$ ，在三类建筑中最大。由图14可见，室温保持在 $20.2\sim 21.2^\circ\text{C}$ ，波动幅度为 1.0°C ，全时段位于 $18\sim 22^\circ\text{C}$ 舒适边界内。较大的室内热容使工业厂房对短时供热功率波动的响应相对迟缓，温度曲线较为平滑，适合承担持续、缓慢的柔性调节。住宅小区见图15，室温稳定在 $22.8\sim 23.0^\circ\text{C}$ ，波动幅度仅 0.2°C ，为三类建筑中最小。住宅小区温度波动较小，一方面与其热阻和墙体热容较大有关，另一方面也反映了住宅负荷相对连续、末端阀控较平缓的特点。

商业楼宇室内热容仅 $800 \text{ kWh/}^\circ\text{C}$ ，由图16可知，室温变化范围为 $20.8\sim 21.7^\circ\text{C}$ ，波动幅度为 0.9°C ，仍处于 $19.5\sim 22.5^\circ\text{C}$ 舒适边界内。商业负荷在7:00后快速抬升，建筑热惯性通过释放部分室内和围护结构蓄热缓冲负荷上升；在低谷或供热富余时段，建筑又吸收热量恢复热状态。商业楼宇热容

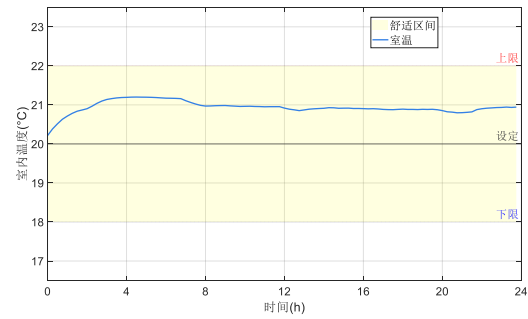


图14 工业厂房室温变化

Fig. 14 Indoor temperatures of the industrial plant

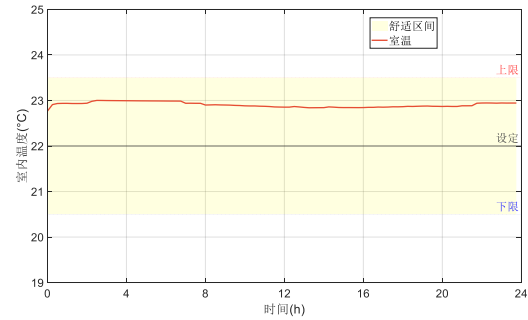


图15 住宅小区室温与墙温变化

Fig. 15 Indoor temperatures of residential community

较小，室温响应较快，因此更适合承担短时、快速的柔性调节^[17]。三类建筑的实际调度贡献不再按各自热状态摆幅单独比较，而统一由建筑虚拟储能进入热平衡的等效充放热功率积分表征。

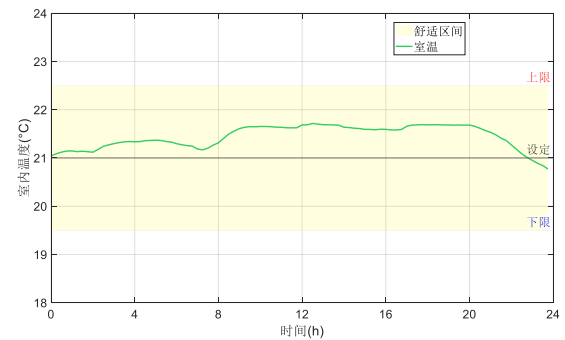


图16 商业楼宇室温变化

Fig. 16 Indoor temperatures of the commercial building

综合比较可知，三类建筑温度变化幅度由热容、热阻、负荷时序、末端阀控和虚拟储能调度方向共同决定。工业厂房室内热容最大，温度响应相对平缓，适合承担持续、缓慢的热量调节；住宅小区墙体热容和热阻较大，且供热份额相对稳定，因

而室温波动最小；商业楼宇室内热容最小，营业启停造成负荷突变，室温响应较快，适合承担短时快速调节。按进入热平衡的等效充放热功率积分统计，建筑群日内实际调用量约为6058.1 kWh，且三类建筑均未越界，说明建筑热惯性可以在舒适边界约束下参与源侧需求修正。

5.6 经济性分析与储能比较

图 17 显示，CHP 燃气费为 101293.5 元，是最大成本项；CHP 售电收益为 58374.6 元，显著抵消燃气费用。GB 燃气费、HP 用电费和运维费用分别为 1438.8 元、6294.6 元和 14788.8 元，最终总运行成本为 65441.2 元。GB 成本占比较低与其仅在峰值时段运行相一致；热泵虽全天运行，但较高 COP 降低了用电成本。需要指出的是，虚拟储能并未被计入独立燃料成本，其经济作用体现在改变等效源侧需求、缓解峰段设备爬坡和减少高成本补峰出力。

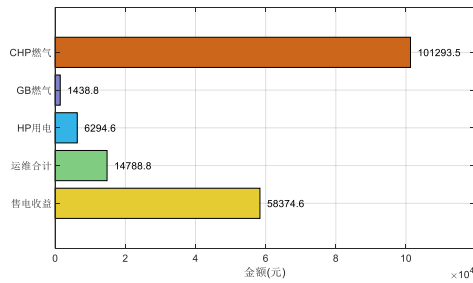


图 17 运行成本构成

Fig. 17 Operating cost composition

图 18 采用同一统计口径比较三类储能资源在调度日内的实际调用量，即实体 TES 的充放热吞吐量以及管网、建筑虚拟储能进入热平衡的等效充放热吞吐量。结果显示，TES 实体储能实际调用量约为 1130.6 kWh，管网虚拟储能约为 1940.7 kWh，建筑虚拟储能约为 6058.1 kWh。该口径直接反映各类资源在 MPC 调度中真实参与热平衡修正的能量规模。结果可知建筑虚拟储能调用量较高，主要因为建筑群热容大、数量聚合后可在舒适边界内提供分布式调节，管网虚拟储能则主要体现为小时级传输延迟和水体蓄热对源侧需求的平滑作用[18]。

$$E_{TES,eq} = E_{TES} / (SOC_{max} - SOC_{min}) = 3816.2 / (0.9 - 0.1) = 4770.2 \text{ kWh} \quad (14)$$

$$C_{inv} = c_E E_{TES,eq} + c_P P_{TES,eq}$$

5.7 对照工况与敏感性验证

为进一步回应虚拟储能独立贡献和协同效应的

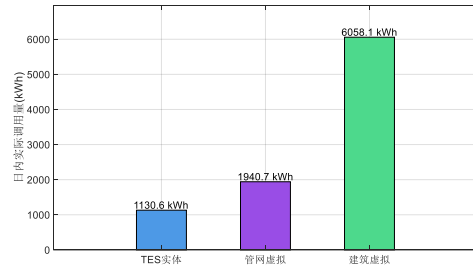


图 18 储能资源日内实际调用量比较

Fig. 18 Comparison of daily actual utilization of energy storage resources 为进一步说明引入虚拟储能的等效配置意义，本文将管网与建筑虚拟储能的等效充放热轨迹折算为新增实体 TES 需求。结果表明，计及管网和建筑虚拟储能后，系统等效源侧热负荷峰值由 8479 kW 降至 8279 kW，削峰量为 200 kW，削峰比例为 2.36%。若将该虚拟储能等效充放热轨迹折算为新增实体 TES 配置需求，则需约 1000 kW 双向充放热功率和 3816.2 kWh 可用储热容量；按 SOC 运行范围 0.1~0.9 折算，对应额定容量约 4770.2 kWh。按容量投资单价 350.0 元/kWh、功率投资单价 500.0 元/kW 估算，潜在等效投资需求约 217.0 万元，具体计算公式如下。该结果仅表示给定调节轨迹下的等效配置价值，并非现有 TES 容量的实际减少。

可辨识性，本文设置无 TES 与无虚拟储能、仅 TES、TES+管网虚拟储能、TES+建筑虚拟储能以及 TES+管网与建筑虚拟储能五类工况。表 2 表明，无 TES 且无虚拟储能时系统最大缺热量达到 676.4 kW，供热满足率降至 99.7%；仅配置 TES 后可实现 100% 供热满足，但无法降低原始峰值需求。引入管网虚拟储能后，等效源侧峰值由 8479 kW 降至 8279 kW，运行成本降至 62989.5 元，说明管网传输延迟和水体蓄热可直接参与削峰；仅引入建筑虚拟储能时，建筑热状态恢复可能带来额外供热需求，单日运行成本并未单调降低。双虚拟储能协同工况下，系统保持 100% 供热满足率，等效峰值维持在 8279 kW。由此可见，本文方法的作用主要体现在削峰、源侧需求修正和降低实体储能依赖，而非在所有工况下均降低单日运行成本。

考虑到 5.0 km 管网在 1.2 m/s 流速下的理论传输延迟约为 1.157 h，略长于 1.0 h 单次预测窗口，本文进一步比较 1 h、2 h 和 4 h 预测时域下的滚动优化结果。由表 3 可知，三种预测时域均实现 100% 供热满足，等效源侧峰值均为 8279 kW，运行成本分别为 65441.2 元、65442.4 元和 65408.1 元，差异小于 0.1%。该结论仅针对本文算例成立：虽然 1 h 预测窗口略短于管网理论传输延迟，但管网温度场在每个控制周期执行后均由 PDE 模型更

表2 不同虚拟储能配置工况对比

工况	虚拟储能类型	满足率/%	最大缺热/kW	运行成本/元	等效峰值/kW
无TES/无VES	无	99.7	676.4	64391.5	8479
仅TES	无	100	0	64484.7	8479
TES+管网VES	管网	100	0	62989.5	8279
TES+建筑VES	建筑	100	0	66498.2	8479
TES+管网+建筑VES	管网+建筑	100	0	65441.2	8279

新，并作为下一轮优化的初始状态反馈，因此滞后影响可通过滚动反馈机制持续修正。

表3 不同MPC预测时域结果对比

预测时域	预测步数	满足率/%	运行成本/元	等效峰值/kW	VES最大放/充/kW
1 h	4	100	65441.2	8279	369.0/1000
2 h	8	100	65442.4	8279	374.6/1000
4 h	16	100	65408.1	8279	376.3/1000

为验证管网PDE数值计算可靠性，本文保持30.0 s内部积分步长不变，比较25、50和100个空间节点下的结果。表4显示，三种网格的Courant数均小于1，满足显式迎风格式稳定性条件；平均沿程温降均约为2.1℃，最大差异约0.1℃。结果说明，在不同空间离散尺度下，管网沿程温降计算结果变化较小，采用50个空间节点能够兼顾计算效率和温度场描述精度，相关结论具有较好的网格鲁棒性。

表4 管网空间网格敏感性分析

空间节点数	Courant数	平均沿程温降/℃
25	0.18	2.087
50	0.36	2.120
100	0.72	2.141

此外，对完整工况进行24 h热平衡校验。核算式如下，统计范围覆盖24 h内全部96个调度步长。计算结果均为0。该校验基于实际执行后的热源出力、TES充放热、虚拟储能净功率和原始热负荷统一核算，而非仅依据优化约束残差，因此可说明虚拟储能作为等效功率进入热平衡后未造成可观测的重复计量或凭空供热。

$$\varepsilon = \sum i P_{CHP,i}^{th} + \sum i P_{GB,i}^{th} + P_{HP}^{th} + P_{SC}^{th} + P_{dis} - P_{ch} - Q_{eff} \quad (15)$$

6 结 论

针对综合能源系统供热侧热网动态与建筑热惯性利用不足的问题，本文构建计及管网和建筑虚拟

储能显式调度的MPC-MILP滚动优化模型，并通过典型冬季日仿真验证源—网—荷—储协同调度效果，主要结论如下：

(1) 所构建模型能够协调CHP、燃气锅炉、热泵、太阳能集热器、TES以及管网和建筑虚拟储能运行，在设备容量、爬坡、储热状态和舒适边界约束下实现100%热负荷满足，总运行成本为65441.2元。CHP1和CHP2分别供热87.5 MWh和39.0 MWh，是系统基础热源；HP供热28.1 MWh，GB主要在峰值时段补充出力，表明滚动优化能够兼顾基础供热经济性与峰值调节可靠性。

(2) 5 km管网呈现明显的热传输时滞与动态蓄热特性，平均沿程温降为2.1℃，理论传输延迟为1.157 h。按实际等效充放热吞吐量统计，管网虚拟储能日内实际调用量约为1940.7 kWh。模型采用30 s内部积分步长求解PDE，Courant数为0.36，满足显式迎风格式稳定性要求；空间网格敏感性分析表明，不同离散节点下管网温降结果变化较小，说明在本文离散尺度下计算结果具有较好的精度鲁棒性。

(3) 建筑热容差异使三类建筑表现出不同的调节特性：工业厂房温度波动为1.0℃，住宅小区为0.2℃，商业楼宇为0.9℃，三者均未越出舒适边界。按进入热平衡的等效充放热功率积分统计，建筑虚拟储能日内实际调用量约为6058.1 kWh，说明建筑群可提供分布式柔性资源，但其调用必须受到舒适边界和热状态恢复约束限制。

(4) 按日内实际调用量统计，TES实体储能、管网虚拟储能和建筑虚拟储能分别约为1130.6、1940.7和6058.1 kWh，管网与建筑虚拟储能合计约为7998.7 kWh。该结果表明，两类热惯性资源并非以“等容量实体储能”的形式替代TES，而是通过等效负荷修正参与削峰填谷；实际调度中虚拟储能最大放热功率为369.0 kW、最大充热功率为1000.0 kW。按本文给定调节轨迹和投资参数折

算, 虚拟储能对应约4770.2 kWh新增 TES 等效配置需求和约217.0万元潜在等效投资。

符号说明:

符号	含义	单位
P_{th} 、 P_e	热功率、电功率	kW
SOC	TES 荷热状态	—
T_{in} 、 T_{wall} 、 T_{out}	室温、墙温、室外温度	℃
C_{in} 、 C_{wall}	室内节点、墙体节点热容	kWh/℃
R_{wall} 、 R_{out}	室内一墙体、墙体一室外热阻	℃/kW
E_{pipe} 、 E_{bld}	管网、建筑等效虚拟储能能量	kWh
η_{ch} 、 η_{dis}	TES 充热、放热效率	—

参 考 文 献

[1] 蒋明轩, 李更丰, 卞艺衡, 等. 计及气/热惯性和延时性的综合能源系统可靠性评估方法[J]. 电力自动化设备, 2025,45(5):19-30,39.
JIANG M X, LI G F, BIAN Y H, et al. Reliability evaluation method of integrated energy system considering gas/thermal inertia and time delay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025,45(5): 19-30,39.

[2] Skrjanc T, Rudez U. Emergency power control of virtual energy storage systems for improved grid stability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2026, 174: 111522.

[3] 苏娟, 李拓, 刘峻玮, 等. 综合能源系统下虚拟储能建模方法与应用场景研究综述及展望[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 53-68.
SU J, LI T, LIU J W, et al. Review and Prospect of Modeling Method and Application Scenarios of Virtual Energy Storage under Integrated Energy System[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 53-68.

[4] 刘东林, 周霞, 戴剑丰, 等. 考虑虚拟储能的建筑综合能源系统双层优化调度策略[J]. 上海交通大学学报, 2026, 60(1): 61-73.
LIU D L, ZHOU X, DAI J F, et al. Bi-Level Optimization Scheduling Strategy for Building Integrated Energy System Considering Virtual Energy Storage[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2026, 60(1): 61-73.

[5] 张涛, 赵天悦, 蔡德福, 等. 计及气-热虚拟储能特性的综合能源系统日前优化调度[J]. 现代电力, 2025, 42(4): 650-658.
ZHANG T, ZHAO T Y, CAI D F, et al. A Day-ahead Optimal Scheduling Method for an Integrated Energy System Considering Characteristics of Gas-thermal Virtual Energy Storage[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(4): 650-658.

[6] 展浩, 于灏, 冷梦琦, 等. 分时电价下供热管网储能优化与实证分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2689-2697.
ZHAN H, YU H, LENG M Q, et al. Optimization and empirical analysis of energy storage in heating networks under time-of-use electricity-price[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2689-2697.

[7] 王欣, 崔承刚, 王想想, 等. 基于安全强化学习的热电联产机组经济

调度策略研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(4): 968-981.
WANG X, CUI C G, WANG X X, et al. Research on Economic Dispatching Strategy of CHP Units Based on SRL[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(4): 968-981.

[8] Håkansson H, Önnheim M, Gustavsson E, Jirstrand M. Effects on district heating networks by introducing demand side economic model predictive control[J]. Energy and Buildings, 2024, 309: 114051.

[9] Guo C, Zhang J, Yuan H, Yuan Y, Wang H, Mei N. Informer-based model predictive control framework considering group controlled hydraulic balance model to improve the precision of client heat load control in district heating system[J]. Applied Energy, 2024, 373: 123951.

[10] Wei Z, Tien P W, Calautit J, Darkwa J, Worall M, Boukhanouf R. Investigation of a model predictive control (MPC) strategy for seasonal thermochemical energy storage systems in district heating networks[J]. Applied Energy, 2024, 376: 124164.

[11] Xin X, Liu Y, Zhang Z, Zheng H, Zhou Y. A day-ahead operational regulation method for solar district heating systems based on model predictive control[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124619.

[12] Liu D, Zhao J, Tian Z, Li Y, Yang Z, Lu S, Lin Q. Optimization of hybrid active-passive solar heating system through day-ahead and real-time control[J]. Energy, 2025, 323: 135816.

[13] 周诗卉, 汤赐, 易锦, 等. 计及供热系统惯性的综合能源系统优化调度[J]. 电工材料, 2026(2): 43-51.
ZHOU S H, TANG C, YI J, et al. Optimal Scheduling of Integrated Energy System Considering Thermal Inertia of Heating System [J]. Electrical Engineering Materials, 2026(2): 43-51.

[14] 韩逸满, 刘寿松, 王志华, 等. 集中空调系统末端研究现状与展望[J]. 制冷学报, 2026,47(4):24-35.
HAN X Y, LIU S S, WANG Z H, et al. Research Status and Prospects of Terminals of Central Air-Conditioning Systems[J]. Journal of Refrigeration, 2026,47(4):24-35.

[15] 吴荣华, 于灏, 李康, 等. 清洁能源热泵供热系统管网储能及其经济性分析[J]. 暖通空调, 2025, 55(3):159-163.
WU R H, YU H, LI K, et al. Energy storage and economic analysis of a clean energy heat pump heating system pipe network[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2025, 55(3): 159-163.

[16] Li J, Xu Q, Liu X, et al. Transient thermal network model for rapid multi-objective optimization of plate-fin latent heat thermal energy storage unit[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 116: 116096.

[17] 侯俊禹, 袁至, 王维庆, 等. 利用建筑虚拟储能提升风电消纳能力的电热联合系统优化调度方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 206-216.
HOU J Y, YUAN Z, WANG W Q, et al. Optimal scheduling method of combined electric and thermal system by using building virtual energy storage to improve wind power accommodation capability[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(5): 206-216.

[18] Kang J, Gao W, Wang J, et al. Building virtual energy storage integrated to the operation of photovoltaic-storage-thermal-flexible system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025: 128685.