储能XXXX

面向电网调控需求的建筑异质储能与柔性负荷协同优化

马嘉欣[1]，李若夏[1,2]，贺　宁[3]，李文杰[3]
（[1]西安建筑科技大学信息与控制工程学院，西安 710055；[2]西安建筑科技大学建筑学院，西安 710055；[3]西安建筑科技大学机电工程学院，西安 710055）

摘　要：面向电网调控需求，提出一种建筑异质储能协同优化方法，将建筑虚拟储能作为主动调节单元纳入电网友好性目标，并构建虚拟储能、实体储能与柔性负荷协同参与的建筑侧灵活资源优化框架，旨在通过需求响应提升建筑对电网调控需求的响应能力，并量化其灵活调节潜力。首先，基于传热学原理刻画建筑虚拟储能的动态蓄放热特性，实现建筑热惯性调节能力的量化表征；进而将削峰填谷惩罚与负荷平滑惩罚引入目标函数，使建筑侧异质储能及柔性负荷的调度策略能够响应电网调控需求，并构建日前优化调度模型，实现异质储能与柔性负荷的协同优化。针对全天负荷优化与短时削峰两种场景开展仿真分析。结果表明，所提方法能够有效挖掘建筑虚拟储能参与电网调控的潜力，并通过虚拟储能、实体储能与柔性负荷的协同作用，降低系统峰谷差、负荷波动性及运行成本。在短时削峰场景中，虚拟储能可替代部分实体热储能出力并提供额外灵活性调节能力，从而增强建筑对电网调控指令的响应能力与整体运行灵活性。

关键词：需求响应；虚拟储能；灵活性潜力量化；协同优化
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0368
中图分类号：TM 732　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-12

Coordinated optimization of building heterogeneous energy storage and flexible loads for power grid regulation

MA Jiaxin[1], LI Rouxia[1,2], HE Ning[3], LI Wenjie[3]
([1]College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; [2]School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; [3]School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Addressing the regulation demands of the power grid, this paper proposes a coordinated optimization method for building heterogeneous energy storage. Building virtual energy storage is incorporated as an active regulation unit into the grid-friendly objective, and a building-side flexible resource optimization framework is constructed, featuring the coordinated participation of virtual energy storage, physical energy storage, and flexible loads. The aim is to enhance the responsiveness of buildings to grid regulation demands through demand response and quantify their flexibility regulation potential. First, based on heat transfer principles, the dynamic heat charging and discharging characteristics of building

收稿日期：2026-05-05；修改稿日期：2026-06-28。
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC3802702），国家自然科学基金（62473301）。
第一作者：马嘉欣（2002—），女，硕士研究生，研究方向为综合能源系统优化调度，E-mail：majiaxin@xauat.edu.cn；通信作者：李若夏，讲师，研究方向为综合能源系统优化调度，E-mail：rli@xauat.edu.cn。
引用本文：马嘉欣, 李若夏, 贺宁, 等. 面向电网调控需求的建筑异质储能与柔性负荷协同优化[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.
Citation：MA Jiaxin, LI Rouxia, HE Ning, et al. Coordinated optimization of building heterogeneous energy storage and flexible loads for power grid regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

virtual energy storage are characterized, enabling quantitative representation of the building's thermal inertia regulation capability. Then, peak-shaving and valley-filling penalties along with load smoothing penalties are introduced into the objective function, allowing the scheduling strategies of building-side heterogeneous energy storage and flexible loads to respond to grid regulation demands. A day-ahead optimal scheduling model is developed to realize coordinated optimization of heterogeneous energy storage and flexible loads. Simulation analyses are carried out for two scenarios: full-day load optimization and short-term peak shaving. The results indicate that the proposed method can effectively unlock the potential of building virtual energy storage for grid regulation. Through the coordinated utilization of virtual energy storage, physical energy storage, and flexible loads, the proposed strategy effectively reduces the peak-to-valley difference, load fluctuation, and operating cost of the system. In the short-term peak shaving scenario, virtual energy storage can replace part of the physical thermal energy storage output and provide additional flexibility regulation capability, thereby enhancing the building's responsiveness to grid regulation commands and overall operational flexibility.

Keywords: demand response; virtual energy storage; flexibility potential quantification; coordinated optimization

随着新能源渗透率不断提高，电力系统运行中负荷波动加剧、峰值负荷增长等问题日益突出，传统仅依赖电源侧调节的运行方式难以充分满足系统灵活调控需求。因此，挖掘需求侧资源参与电网调控，已成为提升新型电力系统安全性、稳定性和灵活性的重要途径[1]。建筑作为全球能源消耗与碳排放的关键主体，若能将建筑转变为可调节单元，则其可从能源消费终端转变为系统中重要的调节力量。在此背景下，建筑可依托建筑综合能源系统（Building Integrated Energy System, BIES）整合电、冷、热等多能流与各类可控设备，实现建筑与电网的双向深度互动[2]。借助需求响应（Demand Response, DR），建筑可为电网提供调峰等辅助服务，缓解电网峰谷压力，提升对间歇性新能源的消纳能力[3]。在电网调控实践中，削峰填谷和负荷平滑是需求侧资源参与系统调节的典型目标。其中，削峰填谷主要反映资源降低峰值负荷、缩小峰谷差的能力；负荷平滑则用于表征资源抑制负荷波动、提升系统运行稳定性的作用[4-5]。因此，将建筑侧灵活资源调度与电网削峰填谷、负荷平滑等调控目标相结合，可推动建筑由被动用能主体进一步转变为主动响应电网调控的需求侧灵活资源。

建筑的灵活性主要源于其内部的灵活性资源，充分挖掘并协同这些资源是实现建筑灵活性最大化、提升其与电网互动效能的关键[6]。建筑灵活性资源包括具有储能性质的实体储能与虚拟储能，以及可灵活调节的柔性负荷[7]。其中，实体储能与虚拟储能统称为异质储能，二者均具备能量时移能力，但实现形式与响应特性存在本质差异。实体储能包括储电与储热两类设备，例如建筑中常见的磷酸铁锂电池储能系统，以及用于存储空气源热泵制热量的蓄热水箱，二者均通过跨时段充放实现能量的时空转移[8-9]。虚拟储能则指利用建筑围护结构的热惯性所形成的一种等效蓄放热能力，其本质是通过围护结构本体的蓄热特性，在室内舒适温度区间内实现热量的存储与延时释放，无需额外配置物理储能设备[10-11]。此外，柔性负荷作为建筑灵活性资源的重要组成部分，包括可削减负荷与可转移负荷，前者如照明等可在一定范围内降低功率的用电设备，后者如洗衣机、电热水器等运行时间可灵活调整的家用电器[12-13]。刘毅力等[14]进一步表明，考虑需求响应的储能配置可降低电压波动与运行成本。然而，单纯依赖实体储能面临投资成本高、运维费用大的问题[15]，限制了其大规模应用的经济可行性。因此，除实体储能和柔性负荷外，具有低边际调节成本和可聚合调度特征的建筑虚拟储能，也可作为需求侧柔性资源参与电网调节。然而，目前建筑虚拟储能在电网削峰、负荷平滑等调控场景中

的作用尚未得到充分挖掘。

近年来，学界针对虚拟储能所蕴含的灵活性潜力，展开了广泛的研究。Jin 等[16]构建了考虑虚拟储能的系统动态优化调度模型，充分利用了空调与建筑耦合下的虚拟储能实现了经济性调度。叶家盛等[17]构建了同时包含电储能设备与虚拟储能的分布式能源系统调度模型，验证了二者协同运行能降低综合费用。研究表明，引入虚拟储能可以在一定程度上提升调度的经济性和环境效益[18]。

然而，现有研究仍存在两方面的不足。其一，现有成果大多将虚拟储能作为实现经济性目标的一种辅助手段，其调度策略并未以提升系统削峰率、降低净负荷波动性等电网友好性指标为核心目标，缺乏将虚拟储能与电网削峰填谷、负荷平滑等需求直接耦合的调度机制，未能充分挖掘虚拟储能在主动支撑电网调峰方面的价值与潜力[19-20]。其二，现有研究较少在统一框架下系统整合虚拟储能、实体储能与柔性负荷。这是由于这三类灵活性资源在响应特性和调控方式上存在本质差异，导致协同优化面临困境。柔性负荷可直接削减负荷，但其调度受限于用户用能行为的不确定性；实体储能虽具备大容量、跨时段调节的能力，但其高投资成本与有限的循环寿命制约了调度经济性；虚拟储能虽具备低边际成本的优势，却受制于室内热舒适区间，调节潜力与时长受限。因此，如何在一个统一的调度框架内协调三者，并以电网友好性为导向优化虚拟储能的调控策略，仍是一个亟待解决的挑战。

与已有研究多将建筑虚拟储能用于建筑侧经济性调度不同，本文进一步将其作为面向电网调控需求的主动响应资源。传统需求响应中通常依赖实体储能和柔性负荷参与削峰、填谷等调控任务，本文在此基础上引入建筑虚拟储能，并构建三类灵活性资源协同响应电网调控需求的统一优化框架。首先，构建三类灵活性资源的数学模型，重点基于传热学原理刻画建筑围护结构与室内热环境的热过程，耦合空气源热泵的电-热转换特性，建立可量化调控的虚拟储能模型。在此基础上，将削峰填谷惩罚与负荷平滑惩罚同时纳入目标函数，使虚拟储能的调度策略直接响应电网调控指令，构建兼顾经济性与电网友好性的日前调度模型，实现异质储能与柔性负荷在统一框架下的协同调度，优化负荷曲线，增强系统灵活响应能力。最后，针对不同电网调控需求设置多组仿真场景，揭示虚拟储能、实体储能与柔性负荷在需求响应机制下的互补协同机理，并量化评估三类灵活性资源对系统运行经济性与灵活性的综合贡献。

1 建筑综合能源系统组成与建模

针对寒冷地区供暖季建筑热电综合用能需求，本节构建了如图1所示计及虚拟储能的建筑综合能源系统。该系统由光伏（Photovoltaic, PV）、配电网、空气源热泵（Air Source Heat Pump, ASHP）、电储能（Electric Energy Storage, EES）、热储能（Heating Energy Storage，HES）、电负荷与热负荷组成，并引入建筑围护结构作为虚拟储能单元。系统中电能由光伏与配电网协同供应，富余电能可存储于EES设备中，在满足基础电负荷需求的同时，驱动ASHP运行；ASHP所产生的热能除直接满足建筑热负荷及HES充能需求外，还可通过围护结构进行蓄热，利用其热惯性延迟放热以调节室内温度。

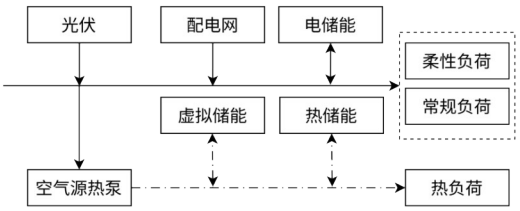


图1 BIES 结构

Fig. 1 Structural diagram of BIES

1.1 光伏

光伏系统通过光电效应将太阳能转换为电能，其输出功率和安装面积约束如下：

$$P_{\mathrm{PV}}(t)=\eta_{\mathrm{PV}}A_{\mathrm{PV}}I(t) \tag{1}$$

$$A_{\mathrm{PV}}\leqslant A_{\mathrm{PV}}^{\max} \tag{2}$$

式中，P_{PV}为光伏出力；η_{PV}为光伏转换效率；A_{PV}为光伏板安装面积；I为太阳辐照强度；$A_{\mathrm{PV}}^{\max}$为建筑可施工面积，由屋顶等适宜安装区域决定；t为运行时刻。

1.2 空气源热泵

ASHP是一种利用电能向室内供暖或热水的节能设备。ASHP需满足以下约束：

$$0\leqslant P_{\mathrm{ASHP}}(t)\leqslant \bar{P}_{\mathrm{ASHP}} \tag{3}$$

$$Q_{\mathrm{ASHP}}(t)=\mathrm{COP}_{\mathrm{ASHP}}P_{\mathrm{ASHP}}(t) \tag{4}$$

式中，P_{ASHP}为ASHP功率；$\bar{P}_{\mathrm{ASHP}}$为ASHP额

定功率；Q_{ASHP}为ASHP转换电能输出的热功率；COP_{ASHP}为ASHP能效系数。

1.3 储能设备

储能设备是提升系统运行灵活性的关键资源之一，通过在电价谷充峰放实现能量时移，有助于平抑负荷波动，减轻对配电网的冲击。其核心运行约束如下：

$$E_{ES}(t)=E_{ES}(t-1)+\left[\eta_{ES}^{ch}P_{ES}^{ch}(t)-\frac{P_{ES}^{dis}(t)}{\eta_{ES}^{dis}}\right]\Delta t \tag{5}$$

$$E_{ES}^{min}\leqslant E_{ES}(t)\leqslant E_{ES}^{max} \tag{6}$$

式中，E_{ES}为ES的剩余容量；P_{ES}^{ch}、P_{ES}^{dis}为ES的充放功率；η_{ES}^{ch}、η_{ES}^{dis}为ES的充放效率；Δt为调度步长，取值1 h；E_{ES}^{max}、E_{ES}^{min}为ES容量上下限。式中ES包括EES和HES设备。

1.4 柔性负荷模型

柔性负荷是建筑综合能源系统中的关键灵活性资源，本研究引入两类柔性电负荷：可转移负荷和可削减负荷。

1.4.1 可削减负荷

可削减负荷指可响应调度并部分或完全中断的电力负荷，其约束如下：

$$0\leqslant P_{cut}(t)\leqslant U_{cut}(t)P_{cut}^{max} \tag{7}$$

$$\sum_{t=1}^{T}U_{cut}(t)\leqslant N_{cut}^{max} \tag{8}$$

式中，P_{cut}为负荷削减功率；U_{cut}为二进制变量，表示是否执行削减，1为削减，0为不削减；T为总调度时长，取24 h；P_{cut}^{max}为单次削减的最大功率；N_{cut}^{max}为最大削减次数。

1.4.2 可转移负荷

可转移负荷是指其使用时间可在一定范围内灵活调整的电气负荷，其满足的约束如下：

$$\sum_{t=1}^{T}P_{tran}^{out}(t)=\sum_{t=1}^{T}P_{tran}^{in}(t) \tag{9}$$

$$0\leqslant P_{tran}^{out}(t)\leqslant U_{tran}^{out}(t)P_{tran}^{max} \tag{10}$$

$$0\leqslant P_{tran}^{in}(t)\leqslant U_{tran}^{in}(t)P_{tran}^{max} \tag{11}$$

$$U_{tran}^{out}(t)+U_{tran}^{in}(t)\leqslant 1 \tag{12}$$

式中，P_{tran}^{out}为转出的负荷功率；P_{tran}^{in}为转入的负荷功率；U_{tran}^{out}、U_{tran}^{in}为二进制变量，分别表示是否执行负荷转出或转入，同一时刻不能同时执行转入和转出；P_{tran}^{max}为单次转移的最大功率。

1.5 建筑虚拟储能动态热过程模型

为将建筑虚拟储能纳入后续优化调度，建立建筑动态热过程模型，用于刻画围护结构蓄热、释热与室内温度变化之间的关系。寒冷地区建筑的外墙、屋顶等围护结构通常采用岩棉、发泡水泥等保温材料，其热传递过程具有一定的延迟和衰减特性，因而能够在一定时间尺度内储存和释放热量。建筑虚拟储能的物理基础正来源于这一热惯性特征：当室内得热量大于失热量时，室内温度升高，围护结构和室内空气吸收并储存部分热量；当室内得热量小于失热量时，室内温度降低，前期储存于围护结构和室内空气中的热量被释放，用于维持室内热环境。因此，室内温度变化是建筑蓄放热过程的外在表现，而室内热平衡方程则是描述该过程的基础关系。基于能量守恒定律，建筑室内热平衡方程可表示为[21]：

$$C\rho V\frac{\mathrm{d}T_{in}(t)}{\mathrm{d}t}=I(t)\cdot SC\cdot SHGC\cdot F_{win}+Q_{heat}(t)+Q_{hg}(t)-Q_{diss}(t)-Q_{i}(t) \tag{13}$$

式中，C为空气比热容；ρ为空气密度；V为建筑室内空气容积；T_{in}为室内温度；I为窗户外表面的太阳辐照度；SC为遮阳系数；SHGC为窗户的太阳得热系数；F_{win}为窗户的面积；Q_{heat}为空气源热泵提供的热量；Q_{hg}为室内人员及设备产生的热增益；Q_{diss}为围护结构传热导致的耗散损失；Q_{i}为空气渗透引起的热交换。

对于具备蓄热能力的围护结构，以一面外墙为例，其热耗散功率可表示为[22]：

$$Q_{diss}^{wall}(t)=F_{wall}\alpha_{in}\left[T_{in}(t)-T_{sur}(t)\right] \tag{14}$$

式中，Q_{diss}^{wall}为外墙的耗散损失；F_{wall}为围护结构面积；α_{in}为内表面换热系数；T_{sur}为围护结构内表面温度。

为了构建适用于电网互动型建筑的精细化虚拟储能模型，本文在经典热平衡模型基础上，进一步考虑不同朝向围护结构太阳辐射的差异，根据建筑热工设计规范分别计算各朝向墙体的室外综合温度[23]，并以此作为边界条件建立围护结构内表面温度传递方程：

$$T_{sur,j}(t)=\bar{T}_{sur}+\frac{1}{v_{out}}\left[T_{zong,j}(t-\xi_{out})-T_{out,av}\right]+\frac{1}{v_{in}}\left[T_{in}(t-\xi_{in})-T_{in,av}\right] \tag{15}$$

式中，$T_{sur,j}$为不同朝向外墙的内表面温度；j为东西南北四个朝向；$\bar{T}_{sur}$为围护结构内表面平均温度；$T_{out,av}$、$T_{in,av}$为室外和室内的平均温度；v_{out}、v_{in}为室外和室内传递至围护结构内表面时的衰减倍数；$T_{zong,j}$为不同朝向外墙的室外综合温度；ξ_{out}、

ξ_{in}为室外和室内传递至围护结构内表面时的延迟时间，以上参数均可根据建筑热工理论确定[23]。

由室内热平衡方程可知，空气源热泵供热功率Q_{heat}是影响室内温度变化的主要可控输入。当室内温度维持在基准设定温度时，室内得热与失热处于动态平衡状态，将该条件下空气源热泵所需提供的供热功率定义为基准热功率。在此基础上，本文以维持基准室温所需的空气源热泵供热功率为参考，刻画实际供热功率偏离基准供热功率时的虚拟储能蓄放热过程，如图2所示。图中黑线为基准供热功率，红线为优化调度下的实际供热功率，二者之间的差值反映建筑虚拟储能的充放热功率。

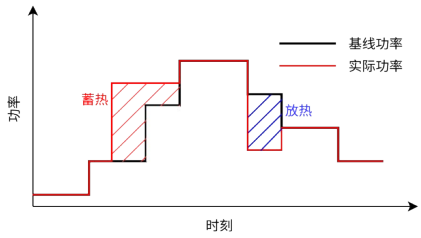


图2 虚拟储能充放功率示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VES charging/discharging power

图2中虚拟储能的充放热功率定义为[21]：

$$Q_{VES}(t) = Q_{heat}(t) - Q_{base}(t) \tag{16}$$

式中，Q_{VES}为虚拟储能的充放热功率，当$Q_{VES} > 0$时，实际供热功率高于基准供热功率，虚拟储能处于蓄热状态；当$Q_{VES} < 0$时，实际供热功率低于基准供热功率，建筑依靠前期储存在围护结构中的热量维持室温，虚拟储能处于释热状态；Q_{heat}为实际供给建筑的热功率；Q_{base}为基准热功率。

为量化建筑虚拟储能在电力侧的调节能力，可将其热功率折算为等效电功率[24]：

$$P_{VES}(t) = \frac{Q_{VES}(t)}{COP_{ASHP}} \tag{17}$$

2 面向电网调控需求的协同优化模型

2.1 目标函数

在建筑侧资源参与电网调控过程中，随着新能源出力波动和峰值负荷压力增加，电网侧通常希望需求侧资源能够降低高峰负荷、缩小峰谷差，并抑制负荷在不同时段之间的剧烈波动。基于此，本文构建了以经济性与电网友好性双重导向的协同调度模型。该优化模型以最小化系统日运行总成本为目标，其目标函数不仅涵盖购电成本F_G、储能设备运维成本F_{ES}等直接成本，也纳入了为响应电网调控而产生的柔性负荷补偿成本F_{DR}、负荷平滑惩罚成本F_{RMS}、削峰填谷惩罚成本F_L。目标函数表达如下：

$$\min F = F_L + F_{RMS} + F_{DR} + F_G + F_{ES} \tag{18}$$

2.1.1 削峰填谷惩罚成本

此项成本通过惩罚净负荷峰谷差，引导建筑侧资源在高峰时段释放调节能力，从而缩小峰谷差并缓解电网调峰压力，由峰谷差惩罚F_{PVL}与削峰激励F_{INC}两部分构成，将削峰收益视为负成本，纳入目标函数：

$$F_L = F_{PVL} + F_{INC} \tag{19}$$

F_{PVL}、F_{INC}可表示为：

$$F_{PVL} = \lambda_{PVL} f_{PVL} \tag{20}$$

$$F_{INC} = -\lambda_{INC} \sum_{t=1}^{N} P_{eff,cut}(t), \quad t \in T_{DR} \tag{21}$$

式中，λ_{PVL}为峰谷差惩罚系数；f_{PVL}为全天峰谷差；λ_{INC}为单位有效削峰功率的激励系数；$P_{eff,cut}$为有效削峰功率，超出电网削峰指令要求的部分不予奖励；T_{DR}为需求响应时间段；N为需求响应时段长度。

峰谷差f_{PVL}定义为净负荷最大值P_t^{max}与最小值P_t^{min}之差：

$$f_{PVL} = P_t^{max} - P_t^{min}, \quad t \in T_{DR} \tag{22}$$

2.1.2 负荷平滑惩罚成本

此项能够抑制净负荷在不同时段之间的剧烈变化，降低响应结束后负荷反弹或形成新的局部峰值的风险，以平抑波动、减小对电网的冲击。其表达式如下：

$$F_{RMS} = \lambda_{RMS} f_{RMS} \tag{23}$$

式中，λ_{RMS}为负荷波动性惩罚系数；f_{RMS}为负荷波动性指标。

负荷波动性用于约束净负荷相对于平均净负荷的整体偏离程度，其表达式为：

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N}(P_G(t) - \bar{P}_G)^2}{N}}, \quad t \in T_{DR} \tag{24}$$

式中，P_G为净负荷；$\bar{P}_G$为平均净负荷。

2.1.3 柔性负荷需求响应补偿成本

此项成本旨在激励用户参与负荷调整，由用户

负荷调整补偿F_{COMP}与用电舒适度惩罚F_{COMF}两部分构成。其表达式如下：

$$F_{DR} = F_{COMP} + F_{COMF} \tag{25}$$

其中F_{COMP}、F_{COMF}可表示为：

$$F_{COMP} = \sum_{t=1}^{N}\left[\lambda_{cut}P_{cut}(t) + \lambda_{tran}P_{tran}^{out}(t)\right], \quad t \in T_{DR} \tag{26}$$

$$F_{COMF} = \lambda_{comf}\sum_{t=1}^{N}\frac{\Delta P(t)}{P_{load}(t)}, \quad t \in T_{DR} \tag{27}$$

式中，λ_{cut}、λ_{tran}为负荷削减与转移的补偿单价；ΔP为负荷调整量；λ_{comf}为舒适度惩罚系数；P_{load}为原始电负荷，此处以在柔性负荷无需转移或中断时的负荷曲线作为用电舒适度基准。

2.1.4 电网购电成本

此项成本是系统与外部电网的能量交互成本：

$$F_G = \sum_{t=1}^{T}\lambda_G(t)P_G(t) \tag{28}$$

式中，λ_G为分时购电价。

2.1.5 储能设备运行成本

此项成本涵盖了内部所有储能设备的运行损耗成本：

$$F_{ES} = \sum_{t=1}^{T}\left[\lambda_{EES}[P_{EES}^{ch}(t) + P_{EES}^{dis}(t)] + \lambda_{HES}[P_{HES}^{ch}(t) + P_{HES}^{dis}(t)]\right] \tag{29}$$

式中，λ_{EES}为电储能的单位充放电运维成本；P_{EES}^{ch}、P_{EES}^{dis}为电储能的充放电功率；λ_{HES}为热储能的单位功率运维成本；P_{HES}^{ch}、P_{HES}^{dis}为热储能设备的充放热功率。

2.2 约束条件

2.2.1 系统能量平衡约束

电功率平衡约束：

$$P_G(t) + P_{EES}^{dis}(t) + P_{PV}(t) = P_{EES}^{ch}(t) + P_{ASHP}(t) + P_{EL}(t) - P_{cut}(t) + P_{tran}^{in}(t) - P_{tran}^{out}(t) \tag{30}$$

式中，P_{EL}为常规的电负荷功率。

热功率平衡约束：

$$COP_{ASHP}P_{ASHP}(t) + P_{HES}^{dis}(t) = P_{HES}^{ch}(t) + Q_{heat}(t) + P_{HL}(t) \tag{31}$$

式中，P_{HL}为热负荷功率。

2.2.2 舒适度约束

虚拟储能的调度通过建筑室内温度的优化控制实现。室内温度需维持在用户舒适范围内：

$$T_{in}^{min} \leqslant T_{in}(t) \leqslant T_{in}^{max} \tag{32}$$

式中，T_{in}^{min}、T_{in}^{max}为用户舒适区间最低、最高温度。

由于目标函数中包含负荷平滑二次惩罚项，同时模型中含有0-1变量，因此本文优化模型属于混合整数二次规划模型。本文采用YALMIP建模并调用Gurobi求解，Gurobi对该类混合整数凸二次规划问题采用分支定界等全局优化方法求解。通过协调三类灵活性资源的运行策略，在满足各项约束的前提下，实现负荷曲线的经济、平滑运行。

3 算例分析

3.1 基础数据

为验证所提协同优化方法的有效性，以供暖季具备围护结构蓄热特性的建筑为研究对象开展仿真分析。第2节所构建的协同优化模型的建筑环境参数与初始负荷数据由EnergyPlus能耗模拟平台提供。以西安市供暖季典型日（12月12日）的气候数据为输入，基于图3所示的六层公寓建筑模型，仿真得到逐时太阳辐射强度、室外温度、光伏出力以及基准室温下的电负荷与热负荷曲线，结果如图4和图5所示。该建筑平面尺寸为30 m×19 m，层高3.6 m，共六层。外墙、屋顶等围护结构采用岩棉、发泡水泥等低导热系数保温材料以提升建筑蓄热能力，各围护结构材料参数详见表1。调度步长为1 h，优化周期为24 h。系统结构如图1所示，配电网与建筑综合能源系统的最大交互功率设为100 kW。分时电价采用西安市现行标准，如图6所示。各设备参数见表2[25]，依据当前国内需求响应市场化省份通行的削峰补偿标准，设定单位有效削峰功率的激励系数为2元/kWh。室内温度调节范围设为18-24℃，符合《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB50736-2012）关于供暖季热舒适区间的推荐值。

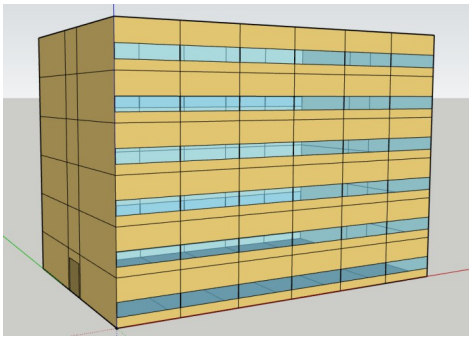


图3 EnergyPlus模拟建筑立面图

Fig. 3 EnergyPlus simulated building elevation drawing

表1 建筑围护结构参数

Table 1 Parameters of the building envelope

建筑围护结构	建筑材料	厚度/mm	面积/m^2	外表面延迟系数/h	传热系数/ W/(m²·K)
外墙	石灰水泥砂浆	25	1721	7.83	0.40
	混凝土	200			
	岩棉板	80			
	石膏	15			
屋顶	防水涂料	9.5	570	9.12	0.22
	发泡水泥	210			
	金属楼承板	1.5			
外门	金属表面	0.8	7	——	1.03
	木材	25			
外窗	单层玻璃	10	388.8	——	2.58

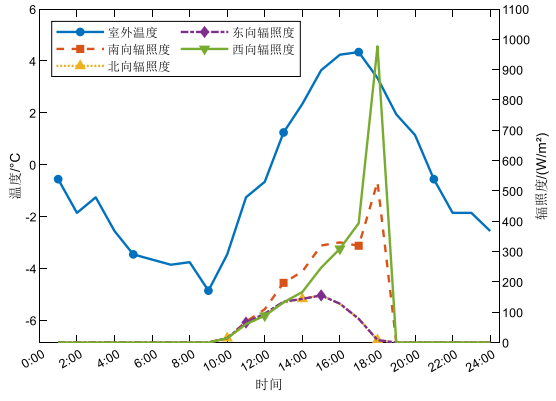


图4 辐照度及室外温度

Fig. 4 Irradiance and outdoor temperature

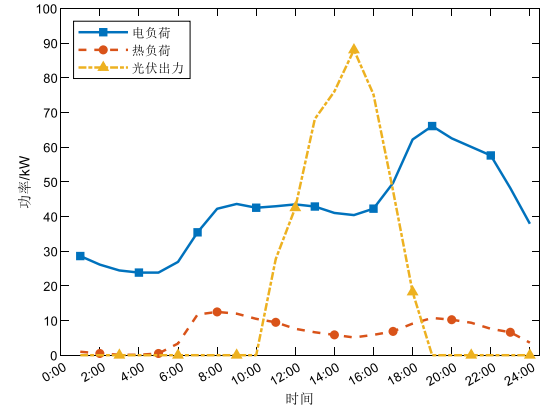


图5 电/热负荷及光伏出力曲线

Fig. 5 Typical daily electrical/thermal load and PV output curves

为验证所提协同调度模型的有效性，并深入揭示三类灵活性资源在不同电网调控需求下的协同机理与综合价值，设置以下三个对比场景：

场景一：不考虑电网友好性目标，室内温度恒定维持在20℃，作为基线场景。

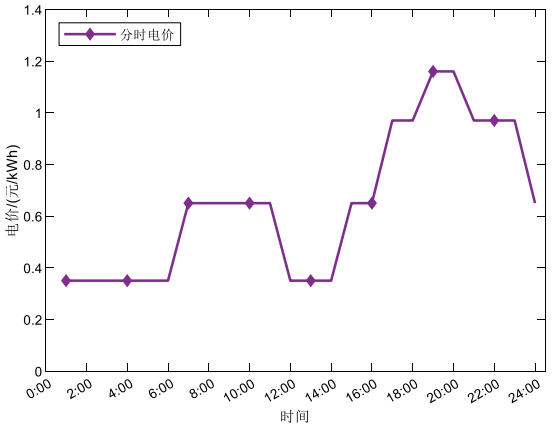


图6 西安市现行分时电价

Fig. 6 Xi'an's current Time-of-Use electricity pricing

表2 建筑综合能源系统设备参数

Table 2 Building energy system equipment parameters

参数	数值
电储能量上下限/ kWh	40/10
电储能充放电效率	0.96
热储能量上下限/ kWh	60/0
热储能充放电效率	0.92
空气源热泵额定功率/ kW	50
空气源热泵制热性能系数	3.5
电储能运行维护成本/(元/kWh)	0.018
热储能运行维护成本/(元/kWh)	0.013
可削减电负荷单位功率补偿成本系数/(元/kWh)	0.2
可转移电负荷单位功率补偿成本系数/(元/kWh)	0.3
电力削峰需求响应的补偿价格系数/(元/kWh)	2

场景二：在经济性调度的基础上响应电网对全天负荷曲线关键指标的优化需求。

场景三：在电网指定时段进行短时削峰响应，响应电网短时、定量削峰需求。

其中，场景二面向电网日内净负荷整形需求，模拟需求侧资源在分时电价和电网友好性目标引导下参与削峰填谷、负荷平滑的调度过程；场景三面向电网高峰时段容量支撑需求，模拟电网在负荷尖峰或供需偏紧时段发布定量削峰指令后，建筑侧资源在指定响应窗口内提供削峰容量的调度过程。

3.2 建筑综合能源系统优化结果分析

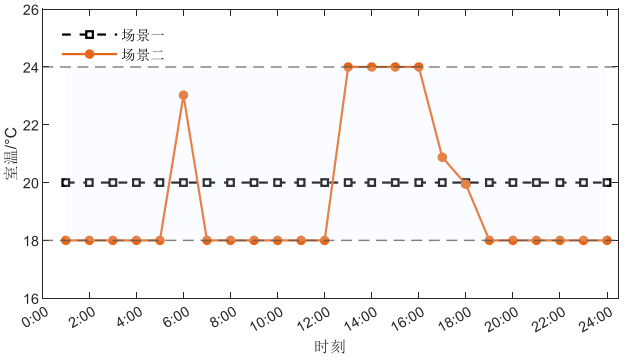
3.2.1 全天候需求响应下负荷曲线调控分析

本节对场景一和场景二的仿真结果进行对比分析，相应场景的净负荷与室内温度变化曲线如图7所示，关键性能指标对比如表3所示，图7b中的柱状部分表示场景二中虚拟储能的充放功率，该功率定义为该场景与场景一的空气源热泵供热量之差，具体计算见式(16)。

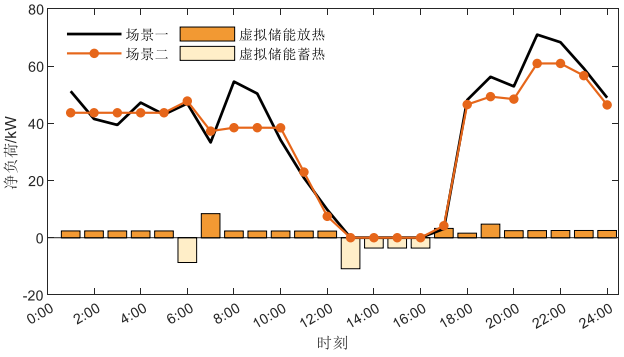
图7与表3的数据表明，在引入全天负荷平滑目标后，系统全天负荷峰谷差降低了14.2%，负荷波动性下降了10.1%，系统总运行成本减少了3.1%，且负荷曲线在高峰时段更为平缓。这些改进主要得益于虚拟储能在光伏充足时蓄热，并于电价高峰前提前升温，随后通过自然放热替代部分供暖需求，从而实现削峰与负荷平移。同时实体储能通过跨时段充放电提供大容量缓冲，柔性负荷通过转移和削减实现快速功率调整，二者共同抑制了负荷峰值。该策略为充分挖掘虚拟储能的调节潜力，将室温长期维持在舒适区间下限，虽有助于经济性与灵活性，但长期可能会影响用户热舒适度。

为进一步验证全天负荷曲线优化结果在不同典型日和跨城市供暖工况下的变化趋势，本文选取西安1月11日、1月25日以及兰州1月16日、1月23日四个供暖典型日开展场景二仿真，结果如表4所示。

综合表4结果可以看出，将削峰填谷和负荷平滑目标嵌入调度模型后，建筑虚拟储能能够在热舒适约束内调整空气源热泵供热时序，使建筑热惯性服务于净负荷曲线优化，而不仅仅服务于建筑侧经济性调度。尽管不同气象条件下优化幅度存在差异，但各工况均呈现出负荷曲线改善和运行成本降低的一致趋势，说明所提方法在不同供暖工况下具



(a) 场景一、场景二温度曲线



(b) 场景一、场景二净负荷曲线与虚拟储能出力

图7 全天负荷曲线优化下净负荷曲线与室温调节
Fig. 7 Net load curve and indoor temperature regulation under all-day load curve optimization

表3 场景一、场景二关键性能指标对比
Table 3 Comparison of key performance indicators between scenario 1 and scenario 2

性能指标	场景一	场景二
峰谷差 f_{PVL} /kW	71.00	60.93
负荷波动性 f_{RMS} /kW	22.47	20.19
运行成本/元	639.32	619.34

表4 不同典型日下场景一与场景二优化结果对比
Table 4 Comparison of optimization results between scenarios 1 and 2 under different typical days

城市-典型日	峰谷差降低量/kW	负荷波动性降低量/kW	运行成本降低量/元	虚拟储能总调节量/kWh
西安-01-11	17.35	2.23	23.05	72.30
西安-01-25	7.71	2.01	76.04	80.19
兰州-01-16	9.16	1.16	55.83	67.71
兰州-01-23	7.77	1.85	72.71	73.31

有一定适用性。

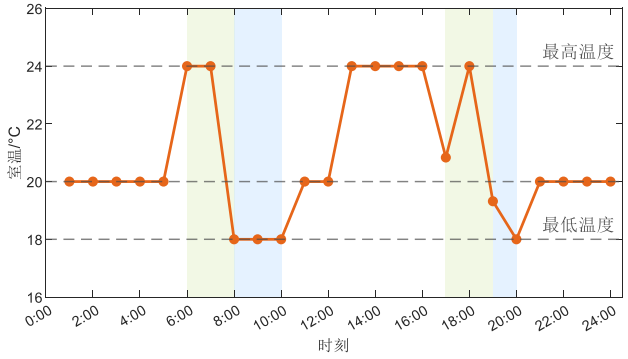
3.2.2 短时削峰响应下的资源协同机制分析

在短时削峰场景中，采用削峰率作为核心量化指标，其定义为：

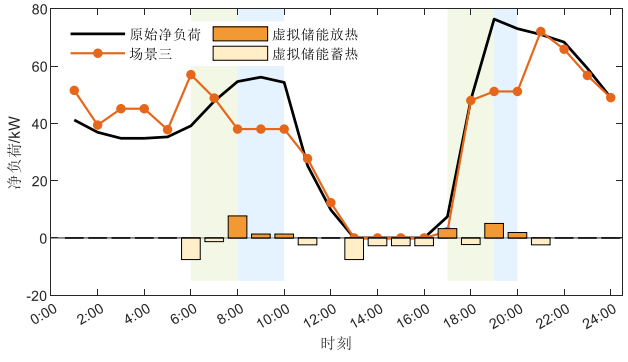
$$\eta_{\text{peak}} = \left(1 - \frac{P_{\text{opt}}(t)}{P_{\text{ref}}(t)}\right) \times 100\%, \quad t \in T_{DR} \tag{33}$$

式中，P_{ref}、P_{opt}为原始净负荷与优化净负荷。

考虑电网在电负荷早高峰（8:00－10:00）和晚高峰（19:00－20:00）发布短时削峰指令，要求削峰率达到原始电负荷的30%。引入虚拟储能后的室温变化曲线和净负荷曲线如图8所示，其中蓝色区域代表短时削峰指令响应区间，绿色区域代表虚拟储能预热区域。



(a) 场景三温度曲线



(b) 场景三净负荷曲线与虚拟储能出力

图8 短时削峰响应下的净负荷与室温调节

Fig. 8 Net load and indoor temperature regulation under short-term peak shaving response

如图8所示，场景三的净负荷在早、晚两个削峰时段内均呈现显著的下降，这一效果得益于虚拟储能的主动调节，其在预调节时段将室温提升至舒适上限进行蓄热，在削峰时段内则减少供热，利用围护结构储存的热能自然放热以维持室温，从而在满足热舒适的前提下实现电负荷的削减。这种预蓄热、自然放热的过程，清晰地体现了虚拟储能的能量时移能力。为量化评估虚拟储能的作用，表5进一步对比了场景三中有无虚拟储能参与的仿真结果，其中无虚拟储能的场景将室温恒定为用户设定温度，其余部分设置与有虚拟储能的场景保持一致。

表5 有无虚拟储能参与下关键性能指标对比

Table 5 Comparison of key performance indicators with and without virtual energy storage participation

性能指标	无虚拟储能场景	有虚拟储能场景
早高峰削峰率	30.64 %	30.90 %
晚高峰削峰率	29.46 %	31.56 %
运行成本/元	490.82	466.37
削峰响应补偿/元	187.00	188.61

如表5所示，引入虚拟储能后，系统在维持削峰效果的同时经济性得到提升。系统的运行成本降低了5.0%，这主要得益于虚拟储能近乎零的边际调节成本。且在晚高峰时段，虚拟储能将削峰率从29.46%提高至31.56%，使系统达到了调控目标，并获得了更高的削峰补偿。为解析三类灵活性资源的内部协同机制，图9展示了三类灵活性资源的出力堆叠图，图中虚拟储能与热储能的功率已折算为等效电功率，其中柱状图的负值表示充能，正值表示放能。

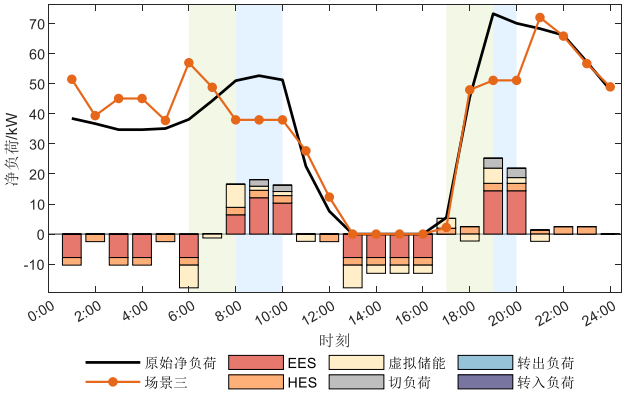


图9 场景三净负荷曲线与资源出力

Fig. 9 Net load curve and resource output in scenario 3

从图9中可以看出，三类灵活性资源在响应削峰指令时的作用时间具有显著差异。实体储能充放电时刻选择高度自由，能够实现跨小时的能量转移，主要受电价信号驱动。柔性负荷则集中响应于削峰时段，其行为受到奖励因子和用户削减意愿影

响，不确定性较大。虚拟储能受热惯性影响，储存的热能会随时间自然衰减，因此无法如实体储能般实现能量的长期储存。为避免所蓄热能因自然耗散而损失，虚拟储能必须在相邻时段内完成充放。这一调控特性使其尤为适用于小时级的短时削峰场景。表6列出了两类场景下三类灵活性资源的削峰调节量，其具体量化方法如下：

$$E_{peak} = \sum_{t=1}^{N} P_{eq}(t)\Delta t, \quad t \in T_{DR} \tag{34}$$

式中，E_{peak}为该资源在削峰响应时段内的总调节量；P_{eq}为该资源的等效放能功率。其中虚拟储能与热储能调节量已折算为等效电功率。

表6 有无虚拟储能参与下削峰调节量对比

Table 6 Comparison of peak-shaving regulation capacity with and without virtual energy storage participation

削峰时段	资源类型	无虚拟储能场景资源调节量/kWh	有虚拟储能场景资源调节量/kWh	有虚拟储能场景资源贡献占比
早削峰	电储能	28.8	28.8	56.5%
	热储能	13.2	7.5	14.7%
	转移负荷	4.3	0	0.0%
	削减负荷	4.2	4.3	8.4%
	虚拟储能	——	10.4	20.4%
晚削峰	电储能	28.8	28.8	59.3%
	热储能	8.8	6.4	13.2%
	转移负荷	——	——	0.0%
	削减负荷	6.4	6.4	13.2%
	虚拟储能	——	7.0	14.4%

表6表明，虚拟储能在削峰过程中发挥了替代与增量双重作用，既能优化替代传统储能，又能为系统提供额外的灵活性调节能力。从考虑虚拟储能场景下早高峰时段的调节贡献占比来看，电储能的贡献最大，占56.5%，虚拟储能次之，占20.4%。由表5可知，无虚拟储能时系统早高峰削峰率已实现30%的削峰目标；引入虚拟储能后，其以低成本替代部分热储出力并减少负荷转移，在维持相近削峰率的同时提升了经济性。虚拟储能替代热储能的根本原因在于二者均为蓄热体，在热功率平衡约束下可相互替代，而虚拟储能利用建筑本体蓄热，边际成本近乎为零，故优化器优先调度其以降低热储能充放损耗。晚高峰时段，电储能占比提升至59.3%，虚拟储能贡献占比为14.4%。由于此时段系统调节需求增大，无虚拟储能场景未能达到削峰目标，而引入虚拟储能后直接将系统削峰率提升至31.56%，实现了显著的灵活性增量贡献。

三类灵活性资源的协同是满足削峰要求并降低运行成本的关键。实体储能充放电过程会产生运维成本；柔性负荷需要支付用户响应补偿。三者协同时，虚拟储能可在削峰时段承担部分调节任务，减少实体储能出力和柔性负荷响应量，从而降低储能运维成本与负荷补偿成本；实体储能承担主要功率支撑，柔性负荷则从负荷侧提供快速调节能力。由此，三类资源在调节成本和功率支撑能力上形成互补，使系统能够以较低成本满足削峰容量需求。

为进一步从资源组合角度验证上述协同效果，本文在场景三基础上补充不同资源组合的消融对比，结果如表7所示。

表7 短时削峰场景下不同资源组合的消融对比

Table 7 Ablation comparison of different resource combinations under short-term peak shaving scenario

序号	资源组合	早高峰削峰率	晚高峰削峰率	运行成本/元
1	实体储能	27.02 %	26.32 %	512.55
2	虚拟储能	5.90 %	6.09 %	656.71
3	柔性负荷	7.81 %	4.30 %	671.13
4	实体储能与柔性负荷	30.63 %	29.46 %	490.82
5	虚拟储能与柔性负荷	14.53 %	10.37 %	618.82
6	三者协同	30.90 %	31.56 %	466.37

由表7可知，三者协同后，系统削峰能力和运行经济性均得到改善。第6组早晚高峰削峰率均高于其他资源组合，运行成本也最低。与实体储能和柔性负荷协同的第4组相比，引入虚拟储能后，削峰效果进一步提升，同时运行成本有所下降。说明虚拟储能的加入不仅增强了系统短时削峰能力，也提高了协同调度的经济性。

为进一步检验短时削峰结果在不同典型日和跨

城市供暖工况下的变化趋势，选取西安1月11日、1月25日以及兰州1月16日、1月23日四个供暖典型日开展场景三仿真，结果如表8所示。

表8 不同典型日下有无虚拟储能的场景三结果对比

Table 8 Comparison of scenario 3 results with and without VES under different typical days

城市-典型日	无虚拟储能场景		有虚拟储能场景	
	削峰率（早/晚）	运行成本/元	削峰率（早/晚）	运行成本/元
西安-01-11	30.00 % / 30.01 %	620.85	30.23 % / 31.40 %	599.46
西安-01-25	29.99 % / 29.99 %	510.08	33.82 % / 31.57 %	488.34
兰州-01-16	30.00 % / 28.47 %	597.98	32.98 % / 31.40 %	574.69
兰州-01-23	30.52 % / 28.72 %	492.98	35.75 % / 31.20 %	465.08

综合表8结果可知，引入虚拟储能后，各典型日的早、晚高峰削峰率均有所提升，说明建筑热惯性能够有效参与峰时负荷调节。不同工况下均呈现出相同的优化趋势，说明本文所提协同优化方法并不依赖于单一典型日气象条件。总体来看，三类灵活性资源协同运行能够在提升削峰效果的同时改善系统运行经济性。

4 结 论

针对建筑需求响应中异质储能与柔性负荷协同调度问题，将建筑虚拟储能由传统建筑侧经济性调节资源进一步拓展为面向电网调控需求的主动响应资源，并构建兼顾经济性与电网友好性的日前优化模型。通过不同场景、不同典型日及跨城市工况下的仿真分析，揭示了虚拟储能、实体储能与柔性负荷在调控过程中的互补协同机理，得到以下结论：

（1）三类灵活性资源在作用时间上具有显著差异。实体储能充放电选择高度自由，可实现跨小时级的能量时移，在削峰时段提供持续稳定的功率支撑；虚拟储能受围护结构热惯性制约，其蓄热量随时间自然衰减，调控窗口主要限于相邻时段；柔性负荷不受储能容量限制，集中作用于削峰激励时段，但其行为受到奖励因子和用户削减意愿影响，不确定性大。

（2）实体储能、虚拟储能与柔性负荷提升了系统运行灵活性，以较低边际成本满足电网调控需求，同时兼顾系统经济性与用户舒适度。虚拟储能通过替代部分热储能出力并减少负荷转移需求，提高系统运行的经济性；实体储能负责提供稳定的深度功率支撑，保障系统稳定运行；柔性负荷则实现快速的负荷削减与转移，从负荷侧为系统提供灵活的调节能力。不同典型日及跨城市工况下的结果进一步表明，所提方法并不依赖于单一典型日气象条件，在不同供暖工况下具有一定适用性。

参 考 文 献

[1] Xu P, Li Z, Xu X, et al. Spatiotemporal dynamics panorama of operational energy consumption and carbon emissions in bamboo buildings: A sample of 275 cities in China[J]. Energy, 2025, 325: 136165.

[2] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报, 2021, 42(08): 84-95.
WANG Y Z, KANG L G, ZHANG J, et al. Development history, typical forms and future trend of integrated energy systems[J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(08): 84-95.

[3] GAO X Z, CHANG P Y, ZHAO Q Y, et al. Operational optimization for electric heat pump clusters based on demand response considering user comfort[J]. Energy and Buildings, 2025: 116272.

[4] Li X, Tian Z, Feng W, et al. Stochastic peak shaving scenario generation for grid-friendly building energy system design[J]. Energy, 2025, 324: 135925.

[5] Yang H, Chen J J, Li Y. Two-layer iterative optimization for enhanced electricity-carbon pricing to promote renewable integration and load smoothing with multi-type prosumer[J]. Energy, 2025: 138226.

[6] WU Y, LIU Z, LI B, et al. Optimal storage capacity for building photovoltaic-energy storage systems considering energy flexibility management[J]. Energy and Buildings, 2025: 115757.

[7] FAN P, WANG D, SUN Y, et al. A generalized flexibility potential quantification method of active thermal energy storage system for grid-interactive efficient buildings[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 117: 116120.

[8] GUO W, LIU D, LIU M, et al. Demand-side resource response characteristics and peak shaving scheduling response model[J]. Energy Reports, 2022, 8: 586-593.

[9] 贺宁, 茹成意, 李若夏, 等. 计及源荷不确定性的BIPV鲁棒优化调度[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(12):132-142.
HE N, RU C Y, LI R X, et al. Robust optimal scheduling of BIPV considering source-load uncertainty[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(12): 132-142.

[10] QIAN C, HE N, CHENG Z, et al. Optimal scheduling of building energy system with integrated virtual energy storage based on multi-task model predictive control[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111185.

[11] 黄旭,祖国强,司威,等. 配电台区灵活资源多时间尺度优化调度方法——以含虚拟储能的建筑微网为例[J]. 储能科学与技术,2024,13(02):568-577.
HUANG X, ZU G Q, SI W, et al. Multi-time-scale optimal scheduling method for flexible resources at distribution stations: A

case study of building microgrid considering virtual storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 568-577.

[12] 薛开阳, 楚瀛, 凌梓, 等. 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 可再生能源, 2019, 8: 1206-1213.
XUE K Y, CHU Y, LING Z, et al. Low-carbon economic optimal dispatch of integrated energy system considering flexible load [J]. Renewable energy resources, 2019, 8: 1206-1213.

[13] 刘蓉晖, 李子林, 杨秀, 等. 考虑用户侧柔性负荷的社区综合能源系统日前优化调度[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2842-2850.
LIU R H, LI Z L, YANG X, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system considering user-side flexible load [J]. Acta energiae solaris sinica, 2019, 40(10): 2842-2850.

[14] 刘毅力,黄怡婷,杨茵. 考虑需求响应的主动配电网储能优化配置[J]. 太阳能学报,2025,46(05):716-724.
LIU Y L, HUANG Y T, YANG Y. Optimal configuration of energy storage in active distribution network considering demand response[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(5): 716-724.

[15] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(01): 158-169.
XIE X R, MA N J, LIU W, et al. Functions of Energy Storage in Renewable Energy Dominated Power Systems: Review and Prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(01): 158-169.

[16] JIN B, LIU Z. Evaluating the impact of virtual energy storage under air conditioning and building coupling on the performance of a grid-connected distributed energy system[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89: 109309.

[17] 叶家盛, 刘青荣, 阮应君, 等. 基于建筑虚拟储能的分布式能源系统优化调度[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5257-5262.
YE J S, LIU Q R, RUAN Y J, et al. Optimization scheduling of distributed energy system based on building virtual energy storage[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(13): 5257-5262.

[18] RAN J, QIU Y, LIU J, et al. Coordinated optimization design of buildings and regional integrated energy systems based on load prediction in future climate conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122338.

[19] TIAN G, SUN Q Z, WANG W. Real-time flexibility quantification of a building HVAC system for peak demand reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(5): 3862-3874.

[20] WANG J, WEI Z, ZHU Y, et al. Demand response via optimal pre-cooling combined with temperature reset strategy for air conditioning system: A case study of office building[J]. Energy, 2023, 282: 128751.

[21] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-591.
JIN X L, MU Y F, JIA H J, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591.

[22] 杨柳, 等. 建筑物理[M]. 第5版. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
YANG L, et al. Building physics[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB 50176-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building: GB 50176-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

[24] GAO X, LI R, CHEN S, et al. A quantitative study of virtual energy storage for rural heat pump heating system based on vehicle-to-home technology[J]. Next Energy, 2025, 7: 100246.

[25] 陈庆斌,杨耿煌,耿丽清,等. 考虑源荷不确定性和柔性负荷的综合能源系统低碳运行调度 [J]. 太阳能学报, 2025, 46 (4): 183-192.
CHEN Q B, YANG G H, GENG L Q, et al. Low-carbon operation scheduling of integrated energy system considering source-load uncertainty and flexible loads[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(4): 183-192.