引用格式：颜哲，杨建荣，戴珂，等. 面向可再生能源消纳的多类型建筑群共享储电柔性调控模型研究[J]. 工业建筑，2026，56(1)：106-114.
YAN Zhe，YANG Jianrong，DAI Ke，et al. A Flexible Regulation Model for Shared Energy Storage of Multi-Type Building Groups Oriented to Renewable Energy Accommodation[J]. Industrial Construction，2026，56(1)：106-114 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25121501

面向可再生能源消纳的多类型建筑群共享储电柔性调控模型研究*

颜　哲[1,2]　杨建荣[1]　戴　珂[1,3]　张永明[2]　张改景[1]　江　燕[4]

（1. 上海市建筑科学研究院有限公司，上海　200032；2. 同济大学建筑与城市规划学院，上海　200092；3. 同济大学经济与管理学院，上海　200092；4. 上海建科咨询集团股份有限公司，上海　200032）

摘　要　建筑业作为能源消耗与碳排放的核心领域，其绿色低碳转型是双碳目标实现的关键。然而，光伏、风电等可再生能源的间歇性与波动性，加之传统独立储电模式存在投资高、利用率低、调度灵活不足等缺陷，严重制约了建筑领域可再生能源消纳与能源系统优化。聚焦居住、办公、工业三类典型建筑，基于其异质用能特性，构建共享储电柔性调控模型，设计差异化调度策略，并通过案例仿真对比无储电、独立储电、共享储电三类模式的运行效果。结果表明：共享储电模式可实现可再生能源全额消纳，解决无储电模式下的弃电问题；与独立储电模式相比，其在运行成本基本持平的前提下，显著降低储电投资成本，且随着光伏装机容量提升，容量降低率呈上升趋势，最高可达 40% 以上；共享储电通过跨建筑协同调度，充分发挥负荷互补优势，提升了能源系统稳定性与资源利用效率。

关键词　共享储电；柔性调控；多类型建筑群；可再生能源消纳

A Flexible Regulation Model for Shared Energy Storage of Multi-Type Building Groups Oriented to Renewable Energy Accommodation

YAN Zhe[1,2]　YANG Jianrong[1]　DAI Ke[1,3]　ZHANG Yongming[2]　ZHANG Gaijing[1]　JIANG Yan[4]

（1. *Shanghai Research Institute of Building Sciences Co.，Ltd.，Shanghai* 200032，*China*；2. *College of Architecture and Urban Planning，Tongji University*，*Shanghai* 200092，*China*；3. *School of Economics and Management，Tongji University*，*Shanghai* 200092，*China*；4. *SRIBS Consulting Group Co.，Ltd.，Shanghai* 200032，*China*）

Abstract：As a core sector of energy consumption and carbon emissions，the green and low-carbon transformation of the construction industry is crucial to achieving the dual carbon goals. However，the intermittency and volatility of renewable energy sources such as photovoltaic (PV) and wind power，coupled with the drawbacks of traditional independent energy storage，including high investment costs，low utilization rates，and insufficient dispatch flexibility，have severely constrained renewable energy accommodation and energy system optimization in the construction field. This study investigated three typical building types：residential，office，and industrial. Based on their heterogeneous energy consumption characteristics，a flexible regulation model for shared energy storage was established，and differentiated dispatch strategies were designed. Case simulations were conducted to compare the operational effects of the three modes：no energy storage，independent energy storage，and shared energy storage. The results indicated that the shared energy storage mode could achieve full utilization of renewable energy，com-

* 新疆自治区重点研发计划(2022B03034-3)；上海市 2022 年度“科技创新行动计划”项目(22dz1207200)。

第一作者：颜哲，博士，主要从事建筑能源系统研究，yanzhe@sribs.com。

通信作者：杨建荣，博士，正高级工程师，主要从事绿色建筑、建筑节能领域研究，yangianrong@sribs.com。

收稿日期：2025-12-15

pletely resolving the power curtailment issue inherent in the no-energy-storage mode. Compared to the independent energy storage mode, the shared mode significantly reduced energy storage investment costs while maintaining comparable operational costs. Moreover, as the PV installed capacity increased, the capacity reduction rate showed an upward trend, reaching a maximum of over 40%. Meanwhile, through cross-building coordinated dispatch, shared energy storage fully leveraged the advantage of load complementarity, thereby enhancing the stability of the energy system and the efficiency of resource utilization.

Keywords: shared energy storage; flexible regulation; multi-type building group; renewable energy accommodation

根据《中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年)》[1]统计,建筑业能耗占全国能源消费总量的36.6%,碳排放总量占全国能源相关碳排放的39.2%。当前,建筑领域作为社会能源消耗与碳排放的关键载体[2],其绿色低碳转型成效直接关乎双碳目标的实现进程,已成为全球能源转型的核心聚焦环节之一[3]。《"十四五"建筑节能与绿色建筑发展规划》[4]明确提出,到2025年城镇新建建筑需全面执行绿色建筑标准,近零能耗建筑实现规模化发展,为建筑领域的转型发展指明了清晰方向。然而,光伏、风电等可再生能源在建筑领域的规模化应用进程中[5],受自然条件影响,其出力具有显著的间歇性、波动性与随机性,导致能源供给与建筑用能需求之间的动态失衡问题日益凸显[6],严重影响了可再生能源的消纳效率与建筑能源系统的稳定运行[7]。

储能作为解决可再生能源规模化消纳、推动能源革命的关键支撑技术[8-9],对构建安全高效、清洁低碳的现代化能源体系具有不可替代的战略意义[10-12]。其中,储电系统可有效衔接可再生能源供给与建筑用能需求,其应用模式与调度策略直接决定了建筑能源系统的整体运行效率与低碳化水平。

然而,传统一对一固定配套储电模式,即单栋建筑配置专属储电设备的模式,存在诸多难以规避的短板。从经济层面来看,初始投资成本较高,常见的磷酸铁锂电池容量单价达1500~2300元/kW·h[13],且单一建筑的用能波动难以充分利用,导致储电资源利用率普遍偏低[14];从调度层面来看,储电资源被局限于单栋建筑内部,缺乏跨建筑、跨时段的协同调度能力,灵活性严重不足,难以适配多类型建筑集群的协同用能需求。与之相比,共享储电模式通过集中化建设、专业化管理与市场化运营的方式[15-18],实现了储电资源的整合,能够充分利用不同建筑的用能负荷错峰特性[19],最大化发挥储电资源价值,有效缓解可再生能源出力波动与建筑用能需求不匹配的矛盾[20],为破解建筑能源供需失衡问题提供了新的解决路径。

近年来,共享储电在园区微网、虚拟电厂等场景中得到初步应用,但多数研究假设建筑负荷特性相近,未充分考虑居住、办公、工业等多类型建筑在用能时序、功率等级及可靠性需求上的显著差异。现有模型往往采用统一调度规则,难以适配异质负荷的柔性调节需求,导致储电资源协同潜力未被充分释放,因此亟需构建面向多类型建筑群的柔性调控模型。

基于上述背景,本文以居住、办公、工业三类典型建筑为核心研究对象,梳理分析三类建筑的用能特性,剖析共享储电的柔性调控原理,研究适配多类型建筑的共享储电调度策略,构建包含决策变量、约束条件与目标函数的共享储电柔性调控模型;选取三类典型建筑开展案例仿真,从可再生能源消纳率、最优储电容量、经济成本等维度,对比分析无储电、独立储电、共享储电三类模式,验证共享储电模式的实践价值与应用优势,以期为推动建筑集群绿色低碳发展提供理论支撑,助力建筑领域绿色低碳转型。

1　共享储电柔性调控原理与策略

共享储电打破独立储电模式下储电设施与单一建筑的绑定关系,实现储电资源的共享与利用[21-23]。与独立储电系统相比,其技术经济优势主要体现在三个维度。一是规模效应显著,通过聚合多用户储电需求降低单位容量投资成本与运维成本;二是调度灵活性高,可同时响应多栋建筑的负荷调节需求与电网的调峰调频指令;三是能源协同性强,能够衔接可再生能源发电侧与建筑用电侧,提升能源系统的稳定性。

建筑负荷的异质性是共享储电制定差异化调

节策略的基础。不同类型建筑在用能场景、设备运行模式和负荷结构上具有明显差异,需要结合其负荷曲线特征,设计相对应的共享储电应用策略。基于此,本文选取居住建筑、办公建筑和工业建筑三类典型建筑,分析共享储电在多建筑场景下的负荷调节机制与应用路径。

1.1　居住建筑

居住建筑的用能行为与居民生活习惯高度相关,负荷曲线呈“双峰一谷”特征[24-25]。早高峰、晚高峰主要由炊事、照明、家电等设备用电构成,午间及凌晨则处于负荷低谷。在电网电价机制引导下,共享储电在凌晨电价低谷时段启动充电模式,一方面吸收电网盈余电能,降低电网低谷运行压力;另一方面为日间及晚间的负荷高峰储备能源。在早、晚用电高峰时段,共享储电释放电能补充居民用电需求,不仅缓解电网峰期供电压力,还可降低居民的峰段电价支出,提升用能经济性。对于配置光伏的居住建筑,共享储电可消纳午间时段的过剩光伏电力,避免弃光造成的能源浪费。

1.2　办公建筑

办公建筑的负荷在工作日内的负荷曲线相对平稳,主要在工作时间出现用电高峰[26-27]。在工作日的用电尖峰期,共享储电通过快速放电弥补电网供电缺口,避免因电压波动或过载导致的办公设备故障,保障办公系统的稳定运行。午间光伏发电量较高且部分办公设备处于待机状态时,共享储电及时储存富余电力,为下午用电高峰储备能源。

1.3　工业建筑

工业建筑负荷具有功率大、连续性强、工艺关联性高等特点,对能源供给的稳定性和可靠性要求远高于民用建筑[28]。针对工业建筑的负荷特性,共享储电可实现动态调峰、备用保障、绿电消纳的服务模式,满足工业生产的多元化能源需求。在生产高峰期,共享储电配合电网参与负荷调节,保障生产连续性。对于半导体、精密制造等对供电可靠性要求较高的行业,储电系统还可作为应急备用电源[29],保障核心生产设备的不间断运行,减少停机损失。

2　共享储电柔性调控模型

本研究的共享储电模型包含三类建筑用户(居住建筑、办公建筑与工业建筑)、共享储电电站以及外部电网。各用户侧配置独立的负荷、分布式电源(光伏与风电)。共享储电电站作为核心枢纽,接收各用户的充放电请求,对各用户的充放电总量进行管理,通过统一调度实现系统稳定运行,从而实现电能的供需平衡与经济最优。

2.1　储电模式设置

1)无储电模式。

无储电模式作为基准对照。该模式下能源系统未接入储电系统,建筑仅能直接消纳本地可再生能源或从电网购电。能源调度遵循本地消纳优先,当本地可再生能源出力大于建筑用电负荷时,优先满足建筑自身用电需求;出力不足部分通过网购电补足。超出负荷的可再生能源则直接作弃电处理。

2)独立储电模式。

独立储电模式分别为每类功能建筑配置独立的储电系统,其核心特征是各建筑配置的储电系统仅服务于其对应的单一建筑,不与其他建筑的储电系统交互,也不参与跨建筑的能源调度。某一建筑的储电系统仅负责消纳该建筑对应的本地可再生能源多余电量,以及在该建筑用电高峰、可再生能源出力不足时释放储存电量,实现该建筑内部的能源供需平衡调节。

3)共享储电模式。

共享储电模式采用建筑群共享储电的集中式配置策略,为整个建筑群统一配置大容量储电系统。与独立储电模式不同,该模式下各建筑可基于自身用能需求与本地可再生能源出力,独立提交充放电请求,但所有请求均由共享储电系统进行集中协调与统一执行,确保系统整体运行安全与经济最优。各建筑的充电功率与放电功率分别汇总为系统总充电功率与总放电功率,再由共享储电系统统一响应。

共享储电模式具有以下两类优势:一是建筑间负荷互补性,不同建筑的负荷高峰与低谷存在时间差(如商业建筑负荷高峰在日间,居住建筑在夜间),其充放电需求可形成互补,模型通过协同调度实现共享储电容量的高效利用;二是共享资源约束,包括共享储电的荷电状态约束、总功率约束及各建筑的充放电功率分配约束,确保系统运行有序。

2.2　决策变量

针对上述独立储电与共享储电两类模式,本模型以储电容量为核心决策变量,同时纳入储电充放电功率、初始荷电状态、电网购电功率、可再生能源

消纳功率等辅助决策变量，实现储电系统全维度优化。各决策变量的定义、维度及物理意义如表 1 所示。表中 N 表示为建筑类型数量，设置为 3，对应居住建筑、办公建筑、工业建筑，T 为仿真时间维度，设置为 24。

表 1　决策变量定义

Table 1　Definition of decision variables

变量符号	维度	物理意义	适用模式
E_i	$N\times1$	第 i 类建筑独立储电系统容量	独立储电
E_{total}	1×1	共享储电系统容量	共享储电
SOC_i	$N\times1$	第 i 类建筑独立储电荷电状态	独立储电
SOC_{total}	1×1	共享储电系统荷电状态	共享储电
$P_{\text{ch},i,t}$	$N\times T$	第 i 类建筑 t 时刻储电充电功率	独立储电/共享储电
$P_{\text{dis},i,t}$	$N\times T$	第 i 类建筑 t 时刻储电放电功率	独立储电/共享储电
$P_{\text{ch,total},t}$	$1\times T$	共享储电 t 时刻总充电功率	共享储电
$P_{\text{dis,total},t}$	$1\times T$	共享储电 t 时刻总放电功率	共享储电
$E_{i,t}$	$N\times T$	t 时刻储电剩余电量	独立储电
E_t	$1\times T$		共享储电
$P_{\text{grid},i,t}$	$N\times T$	第 i 类建筑 t 时刻电网购电功率	全模式
$P_{\text{ren,used},i,t}$	$N\times T$	第 i 类建筑 t 时刻消纳的可再生能源功率	全模式
$P_{\text{curtail},i,t}$	$N\times T$	第 i 类建筑 t 时刻弃风弃光功率	全模式
$u_{\text{ch},i,t}$	$N\times T$	储电充电状态二进制变量	独立储电
$u_{\text{ch},t}$	$1\times T$	（1 表示充电，0 表示不充电）	共享储电
$u_{\text{dis},i,t}$	$N\times T$	储电放电状态二进制变量	独立储电
$u_{\text{dis},t}$	$1\times T$	（1 表示放电，0 表示不放电）	共享储电

注：SOC 为储电荷电状态。

2.3　约束条件

2.3.1　荷电状态约束

SOC 需满足安全运行区间，如式（1）所示，其边界设置为 0.1 与 0.9，避免储电过充过放导致的寿命损耗[30]。

$$SOC_{\text{low}} \leqslant SOC_i \leqslant SOC_{\text{high}} \tag{1a}$$

$$SOC_{\text{low}} \leqslant SOC_{\text{total}} \leqslant SOC_{\text{high}} \tag{1b}$$

式中：SOC_{low}、SOC_{high} 分别为荷电状态的设定下限值和上限值。

2.3.2　储电功率约束

最大充放电功率与容量满足线性耦合约束，如式（2）所示。

$$P_{\text{max},i} = C_{\text{rate}} E_i \tag{2a}$$

$$P_{\text{max,total}} = C_{\text{rate}} E_{\text{total}} \tag{2b}$$

式中：C_{rate} 为电池充放电速率，设置为 1[31]。

2.3.3　充放电互斥约束

为避免储电充放电状态冲突，引入二进制变量和 Big-M 法[32]实现充放电功率互斥约束，独立储电模式如式（3a）~（3c）所示，共享储电模式如式（3d）~（3f）所示。

$$u_{\text{ch},i,t} + u_{\text{dis},i,t} \leqslant 1 \tag{3a}$$

$$0 \leqslant P_{\text{ch},i,t} \leqslant u_{\text{ch},i,t} M \tag{3b}$$

$$0 \leqslant P_{\text{dis},i,t} \leqslant u_{\text{dis},i,t} M \tag{3c}$$

$$u_{\text{ch},t} + u_{\text{dis},t} \leqslant 1 \tag{3d}$$

$$0 \leqslant P_{\text{ch},t} \leqslant u_{\text{ch},t} M \tag{3e}$$

$$0 \leqslant P_{\text{dis},t} \leqslant u_{\text{dis},t} M \tag{3f}$$

式中：M 为足够大的正数，取 1×10^{12}。

2.3.4　能量平衡与循环约束

储电剩余电量需满足时序能量平衡，如式（4）所示。

$$E_{i,1} = SOC_{\text{init},i} E_i + \eta_c P_{\text{ch},i,1} - \frac{P_{\text{dis},i,1}}{\eta_{\text{d}}} \tag{4a}$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + \eta_{\text{c}} P_{\text{ch},i,t} - \frac{P_{\text{dis},i,t}}{\eta_{\text{d}}} \quad t = 2,\cdots,T \tag{4b}$$

式中：$SOC_{\text{init},i}$ 为第 i 类建筑初始时刻储电系统荷电状态；η_{c}、η_{d} 分别为充电和放电效率，均设置为 0.95[33]。

2.4　目标函数

本模型以系统日总成本最小化为目标函数，如式（5）所示。通过整合电网购电成本与储电投资成本，实现储电容量的经济性优化。

$$Cost_{\text{total},i} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(P_{\text{grid},i,t}\lambda_{i,t}\right) + \frac{1}{365}\sum_{i=1}^{N}(FE_i) \tag{5a}$$

$$Cost_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(P_{\text{grid},i,t}\lambda_{i,t}\right) + \frac{1}{365}(FE_{\text{total}}) \tag{5b}$$

式中：$Cost_{\text{total},i}$ 为独立储能模式日总成本；$Cost_{\text{total}}$ 为共享储能模式日总成本；$\lambda_{i,t}$ 为分时电网电价；F 为储电年化投资成本，设置为 140 元/（kWh·a）[13]。

3　案例研究

3.1　案例设置

3.1.1　建筑负荷

为覆盖城市终端能源消耗的核心场景，本案例选取上海市某地块的居住、办公、工业三类建筑作为案例对象。其中，居住建筑总建筑面积为 2920 m²，其用电特性与居民作息相关联，最大负荷为 233.47 kW，平均负荷为 77.57 kW，负荷率为 33.22%。办公建筑为中型写字楼，建筑面积为

2330 m²，负荷主要来源于办公设备、中央空调及公共照明系统，最大负荷为465.43 kW，平均负荷为204.27 kW，负荷率为43.89%。工业建筑为生产厂房，建筑面积为1675 m²，负荷具有低波动性特征，最大负荷为669.88 kW，平均负荷为560.80 kW，负荷率为83.72%。三类建筑的典型日负荷数据如表2、图1所示。

表2　三类建筑典型日负荷数据统计

Table 2　Statistics of typical daily load data for three types of buildings

建筑类型	最大值/kW	最小值/kW	平均值/kW	峰谷差/kW	负荷率/%
居住建筑	233.47	18.43	77.57	215.04	33.22
办公建筑	465.43	37.23	204.27	428.20	43.89
工业建筑	669.88	478.49	560.80	191.39	83.72

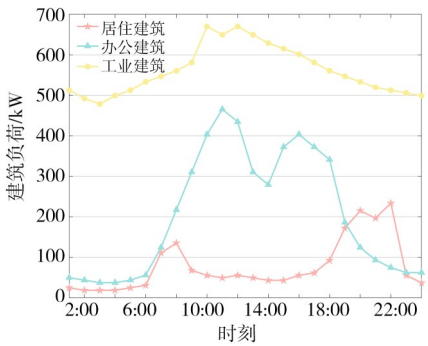


图1　典型日负荷曲线

Fig. 1　Typical daily load curves

由图1可知，三类建筑负荷曲线呈异质性。居住建筑呈“双峰一谷”型（早高峰7:00—9:00、晚高峰18:00—22:00）；办公建筑工作日负荷集中于8:00—18:00，午间略有回落；工业建筑则全天负荷平稳，峰谷差最小。

3.1.2　可再生能源数据

分布式可再生能源系统包含光伏与风电，其归一化功率曲线如图2所示。光伏出力集中在9:00—17:00，峰值出现在正午；风电出力则在午间与夜间较强。案例中不同类型建筑的光伏与风电分布式电源装机容量配置详见表3。

3.1.3　分时电价

本案例分时电价设定：峰段（8:00—11:00、18:00—21:00）电价为1.59元/(kW·h)，平时段（6:00—8:00、11:00—18:00、21:00—22:00）电价为0.89元/(kW·h)；谷段（22:00—次日6:00）电价为0.36元/(kW·h)，详见图3。

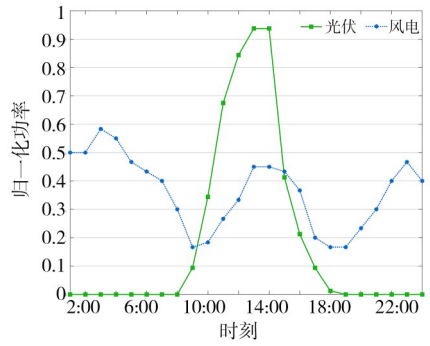


图2　光伏、风电归一化功率曲线

Fig. 2　Normalized power curves of photovoltaic and wind power

表3　光伏与风电分布式装机容量

Table 3　Distributed installed capacities of photovoltaic and wind power　kW

建筑类型	光伏装机容量	风电装机容量
居住建筑	180	0
办公建筑	250	100
工业建筑	400	200
总计	830	300

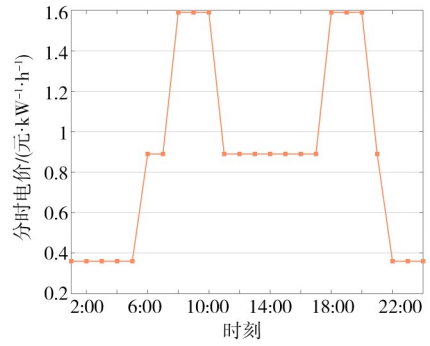


图3　分时电价

Fig. 3　Time-of-use electricity price

3.2　仿真结果

1）无储电模式。

未接入储电系统时，由于居住建筑与办公建筑配置了较高比例的可再生能源，在光照充足、风力条件优越等条件下，建筑自身可再生能源发电量将超过同期用电需求，导致净负荷呈负值，如图4所示。无储电模式下三类建筑用电统计见表4，可再生能源日弃电量达501.2 kW·h。

由于缺乏有效的能源存储与消纳机制，多余的电能无法被留存供后续使用，最终只能采取弃电处理，不仅造成了可再生能源的浪费，也降低了建筑能源系统的整体利用效率与经济性。

2）独立储电模式。

针对三类建筑的负荷特性与用能需求，经优化

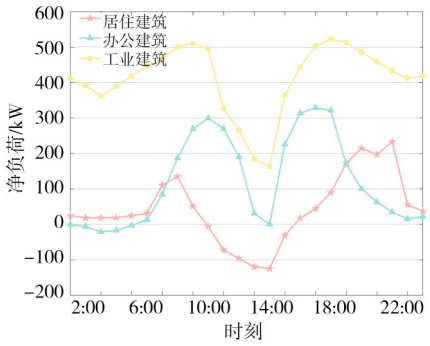


图 4　无储电模式下三类建筑净负荷曲线

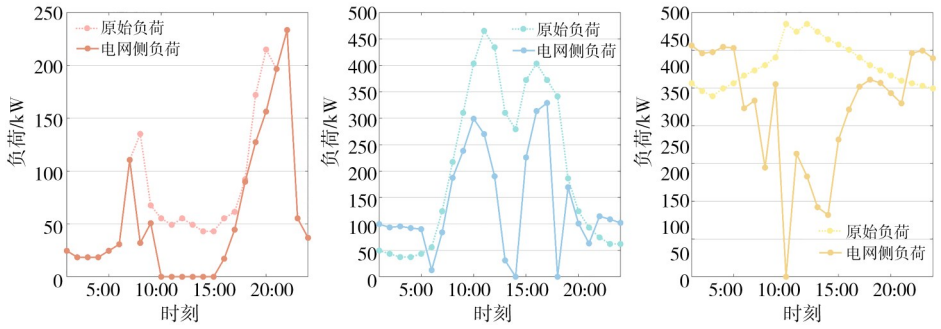
Fig. 4　Net load curves of three types of buildings under no-energy-storage mode

计算得出各类建筑的最优储电容量，其中居住建筑配置 268 kW·h、办公建筑配置 465 kW·h、工业建筑配置 930 kW·h，系统总储电容量达 1663 kW·h。此时，电网侧负荷曲线如图 5 所示。独立储电配置模式下三类建筑的用电特性统计结果见表 5。在此模式中，可再生能源发电可实现全额消纳，无弃电现象，日运行成本为 13095.7 元。

表 4　无储电模式下三类建筑用电统计

Table 4　Statistics of electricity consumption for three types of buildings under no-energy-storage mode

建筑类型	可再生能源日弃电量/(kW·h)	可再生能源日用电量/(kW·h)	电网日购电量/(kW·h)	日运行成本/元
居住建筑	452.1	369.2	1492.5	1564.4
办公建筑	49.1	1963.2	2939.4	3521.8
工业建筑	0.0	3568.3	9890.8	9206.1
总计	501.2	5900.7	14322.7	14292.3



（a）居住建筑　（b）办公建筑　（c）工业建筑

图 5　独立储电模式下三类建筑电网侧负荷曲线

Fig. 5　Load curves of three types of building power grids under independent energy storage mode

表 5　独立储电模式下三类建筑用电统计

Table 5　Statistics of electricity consumption for three types of buildings under independent energy storage mode

建筑类型	可再生能源日弃电量/(kW·h)	可再生能源日用电量/(kW·h)	电网日购电量/(kW·h)	日运行成本/元
居住建筑	0.0	821.3	1040.4	1236.0
办公建筑	0.0	2012.3	2890.3	3220.6
工业建筑	0.0	3568.3	9890.8	8639.1
总计	0.0	6401.9	13821.5	13095.7

3）共享储电模式。

共享储电模式下，系统最优储电容量为 1395 kW·h，较独立储电模式减少 268 kW·h，减少比例达 16.1%，体现了建筑间负荷互补带来的资源优化配置效应。电网侧负荷曲线如图 6 所示。

图 7 为共享储能 *SOC* 曲线。可知：在 22:00—6:00 期间，共享储能利用低谷电与夜间风电充电使 *SOC* 逐步上升至 0.9；在 6:00—8:00 保持 *SOC* 在 0.9 的高值；在 8:00—10:00，共享储能放电，*SOC* 迅速下降至约 0.34；在 10:00—16:00，共享储能利用光伏充电，*SOC* 回升至 0.5 左右；在 16:00—18:00 共享储能再次快速放电，*SOC* 降至 0.1；18:00—22:00 共享储能 *SOC* 维持在 0.1 的低值。

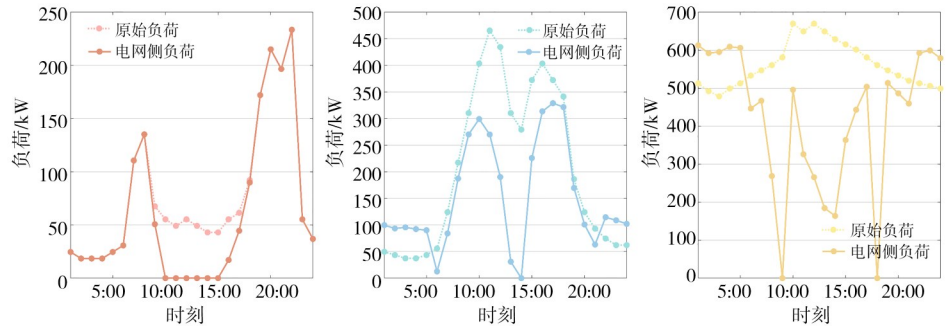
表 6 为共享储电模式下三类建筑用电统计。在此模式中，可再生能源发电可实现全额消纳，日运行成本为 13099.7 元。

3.3　模式对比与讨论

3.3.1　可再生能源消纳效果对比

在无储电配置的模式下，该建筑群可再生能源总弃电量为 501.2 kW·h，弃电率达 7.8%，弃电现象主要集中于居住建筑午间光伏出力高峰期。由于建筑自身用电负荷难以完全消纳波动性强的可再生能源出力，且缺乏有效的能源存储缓冲机制，导致部分清洁电力无法被利用而造成浪费，表明了储电系统在提升可再生能源消纳能力中的必要性。

独立储电与共享储电配置模式下，均实现了可再生能源全部消纳。然而，两类储电模式的可再生



（a）居住建筑　（b）办公建筑　（c）工业建筑

图6　共享储电模式下三类建筑电网侧负荷曲线

Fig. 6　Load curves of three types of building power grids under shared energy storage mode

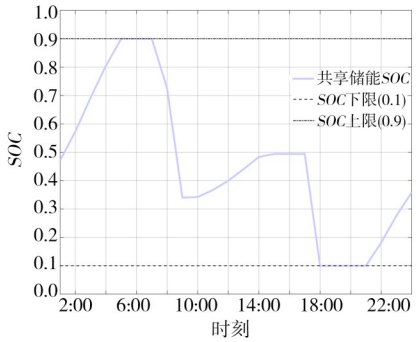


图7　共享储电模式下共享储能*SOC*曲线

Fig。7　*SOC* curve under shared energy storage mode

表6　共享储电模式下三类建筑用电统计

Table 6　Statistics of electricity consumption for three types of buildings under shared energy storage mode

建筑类型	可再生能源日弃电量/（kW·h）	可再生能源日用电量/（kW·h）	电网日购电量/（kW·h）	日运行成本/元
居住建筑	0.0	821.3	1040.4	1564.4
办公建筑	0.0	2012.3	2890.3	3782.5
工业建筑	0.0	3568.3	9890.8	7752.8
总计	0.0	6401.9	13821.5	13099.7

能源消纳机制存在本质差异。独立储电模式的消纳能力受限于储电容量，消纳模式具有较强的独立性与局限性。而共享储电模式通过能源协同调度，可将某一建筑在特定时段产生的富余可再生能源，调配至其他时段存在用能缺口的建筑或后续用能高峰。该模式突破了单一建筑的储电容量约束与用能边界限制，为高比例可再生能源接入建筑群能源系统提供了更具灵活性、经济性与可持续性的消纳解决方案，也为分布式能源系统的协同优化运行提供了新的技术路径。

3.3.2　经济成本效益对比

表7为三类模式成本对比。无储电模式的日运行成本和日总成本均为14292.3元，为三类模式中最高；独立储电模式通过提高可再生能源消纳率与削峰填谷，将日运行成本降至13095.7元，但需额外承担638.0元的日均投资成本，日总成本为13733.7元；共享储电模式的日运行成本为13099.7元，与独立储电模式相比仅高出4.0元，差异可忽略不计，而其日均投资成本仅为535.0元，较独立储电模式降低103.0元，日总成本降低至13634.7元，为三类模式中成本最优的方案。共享储电模式既延续了储电系统消纳可再生能源与削峰填谷带来的运行成本优势，又通过资源共享机制降低了储电系统建设成本投入，综合效益显著优于独立储电模式。

表7　三类模式成本对比

Table 7　Cost comparison of the three modes

模式	日运行成本/元	日均投资成本/元	日总成本/元	较无储电降幅/%	较独立储电降幅/%
无储电模式	14292.3	0.0	14292.3	—	—
独立储电模式	13095.7	638.0	13733.7	3.9	—
共享储电模式	13099.7	535.0	13634.7	4.6	0.7

3.3.3　储电容量对比

图8为配置830 kW光伏和300 kW风电场景下独立储电与共享储电的容量配置差异。独立储电模式为三类建筑分别配置268，465，930 kW·h，总计1663 kW·h，而共享储电模式仅1395 kW·h，容量降低16.1%。

图9为不同可再生能源装机容量下的共享储电相比独立储电的最优储电容量降低率。在建筑能源系统的共享储电与虚拟电厂模式中，光伏与风电装机容量的变化，直接主导着最优储电容量的变化规律。当光伏与风电总装机容量处于较低水平时，建筑能源系统的用能负荷峰谷差相对稳定，且可再生能源出力的波动性和间歇性较弱，此时共享储电

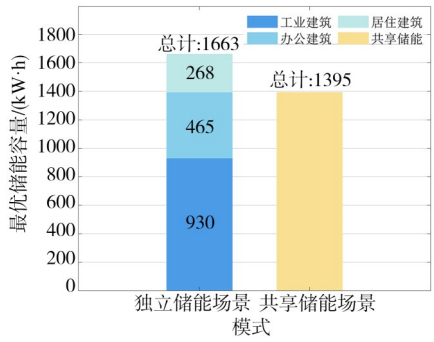


图 8　独立储电和共享储电模式下最优储电容量对比

Fig。8　Comparison of optimal energy storage capacity between independent and shared energy storage modes

的容量优化空间有限，更多承担的是单一建筑的负荷平抑任务，与独立储电的功能重叠度较高，对于减少最优容量不明显。当光伏装机容量升高时，由于光伏出力受昼夜和天气影响呈明显周期性波动，共享储电的容量降低率先快速提升后波动上升。而风电装机容量升高时，储电容量减少率呈先上升后下降的趋势。随着光伏装机容量的提升，最优储电容量降低率呈上升趋势。一方面，更高的装机容量意味着可再生能源出力的峰值更高、波动范围更广，单一建筑的独立储电需预留大量冗余容量以应对出力波动和负荷突变，而共享储电通过虚拟电厂的资源整合能力，可实现不同建筑间可再生能源出力的时空互补，大幅降低了整体储电的冗余需求，降低比例可达 40% 以上。另一方面，虚拟电厂的协同调度能力在高装机容量场景下更能凸显优势，通过对多建筑用能负荷和可再生能源出力的集中预测与统筹安排，共享储电可精准匹配负荷需求与能源供给，进一步提升储电利用效率，从而在满足系统运行稳定性的前提下，显著降低最优储电容量。

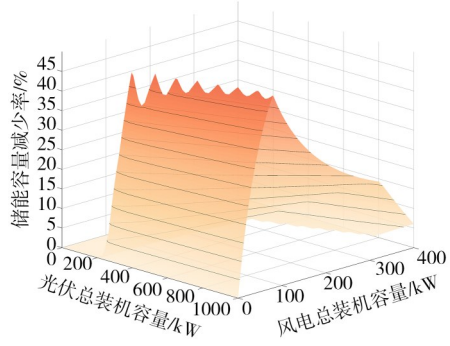


图 9　不同可再生能源装机容量下的共享储电相比独立储电的储电容量减少率

Fig. 9　Reduction rate of shared energy storage capacity compared to independent energy storage capacity under different renewable energy installed capacities

4　结束语

本文围绕多类型建筑的共享储电柔性调控问题，通过理论建模与案例仿真，系统分析了无储电、独立储电与共享储电三类场景的运行特性，得出以下结论：

1）共享储电为建筑领域可再生能源消纳提供了高效解决方案。无储电场景下可再生能源弃电率达 7. 8%，而共享储电通过跨建筑、跨时段的协同调度，突破了单一建筑的储电容量与用能边界限制，实现可再生能源全部消纳，其消纳机制较独立储电模式更具灵活性与可持续性。

2）共享储电兼具显著的成本优势与资源优化效益。与独立储电相比，在运行成本基本不变的情况下，共享储电场景的最优储电容量减少 16. 1%，在保障系统稳定运行的同时，实现了投资成本与运行成本的优化，综合效益显著优于传统储电模式。并且随着光伏装机容量提升，共享储电相对独立储电的容量降低率呈上升趋势，最高可达 40% 以上。

未来研究可进一步拓展建筑类型覆盖范围，并结合神经网络等技术手段优化共享储电的实时调度策略，提升应对负荷与可再生能源出力波动的精准性；同时可探索共享储电与电力市场机制的协同模式，完善其市场化运营路径，进一步释放共享储电的技术经济潜力。

参　考　文　献

[1]　蔡伟光，于艳辉，刘源．中国城乡建设领域碳排放研究报告（2024 年）[J]．建筑，2025(2)：56-63.

[2]　MAHMOOD S，SUN H，ALI A A，et al. Active learning-based machine learning approach for enhancing environmental sustainability in green building energy consumption [J]. Scientific Reports，2024，14(1)：19894.

[3]　董晓，刘加平．论全面推行绿色建筑与“双碳”目标实现 [J]．建筑科学，2025，41(4)：1-5.

[4]　张颖．布署九大重点任务明确五项保障措施 住建部印发《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》[J]．中国勘察设计，2022(3)：8-9.

[5]　田广，刘培．分布式可再生能源系统建模与优化综述 [J]．动力工程学报，2025，45(10)：1738-1756.

[6]　张永明，于杰生，颜哲．碳中和背景下建筑电气行业变革与对策 [J]．智能建筑电气技术，2022，16(3)：9-14.

[7]　YU J，ZHANG Y，YAN Z，et al. A multi-objective optimized approach to photovoltaic-battery systems constrained by transformer capacity for existing buildings [J]. Energies，2025，18(13)：3339.

[8] YAN Z, ZHANG Y, YU J. Allocative approach to multiple energy storage capacity for integrated energy systems based on security region in buildings [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84:110951.

[9] YAN Z, ZHANG Y, LIANG R, et al. An allocative method of hybrid electrical and thermal energy storage capacity for load shifting based on seasonal difference in district energy planning [J]. Energy, 2020, 207:118139.

[10] 任俊良，夏伟，王昌图. 我国储能创新研究的热点及未来发展趋势[J/OL]. 储能科学与技术，2026[2026-01-08]. https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1050.

[11] 陈海生，李泓，徐玉杰，等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术，2025，14(6)：2149-2192.

[12] 唐文虎，聂欣昊，钱瞳，等. 面向新型电力系统安全稳定的储能应用技术研究综述与展望[J]. 广东电力，2024，37(12)：3-15.

[13] 梁毅，田思源，张颖. 用户侧储能经济性研究[J]. 中外能源，2024，29(10)：18-28.

[14] 卢昭龙，朱建全，傅国斌，等. 基于非合作博弈的共享储能与多产消者交易策略[J/OL]. 分布式能源，2026[2026-01-08]. https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.25100317.

[15] 陈昌铭，章天晗，沈子康，等. 新型电力系统的发用电侧共享储能商业模式研究综述[J]. 电力系统自动化，2025，49(15)：20-42.

[16] 孙英聪，陈来军，唐明睿，等. 集中式共享储能运行优化关键技术与研究展望[J]. 高电压技术，2025，51(9)：4505-4519.

[17] 赵振宇，林杉，马乾鑫. 基于分布鲁棒优化的综合能源系统共享储能规划[J]. 电力建设，2025，46(11)：58-70.

[18] 樊慧，牛玉广，陈玥，等. 计及共享储能服务质量定量评估的多虚拟电厂调度策略[J]. 太阳能学报，2025，46(10)：77-87.

[19] 任洪波，徐佩佩，李琦芬，等. 基于多元负荷平准化的区域建筑群混合优化[J]. 暖通空调，2020，50(10)：114-119.

[20] 张永明，颜哲，白玮，等. 综合能源规划中配网/用户侧锂电池储能系统的技术经济研究[J]. 智能建筑电气技术，2020，14(5)：93-100.

[21] 郑晓东，石天卓，张盼盼，等. 耦合交通预测多智能体强化学习的虚拟聚合储能多充电站协同调度[J/OL]. 电网技术，2026[2026-01-08]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0918.

[22] 王晗雯，马智刚，钱欣，等. 面向资源集群调控的园区共享储能分布鲁棒优化配置方法[J]. 太阳能学报，2025，46(11)：69-78.

[23] 胡水彬，李大华，孔祥玉，等. 电碳市场下考虑共享储能的多主体综合能源系统主从博弈优化运行[J]. 太阳能学报，2025，46(11)：481-491.

[24] 罗西，李停停. 居住建筑柔性用能负荷关联特性及优化调控研究[J]. 太阳能学报，2025，46(6)：385-392.

[25] 王天一，侯佳煜，杨悦. 苏州市居住建筑能耗与居民用能行为调查[J]. 上海节能，2025(6)：892-896.

[26] 吴蔚沁，蒋友娣. 基于上海市能耗监测平台数据的办公建筑用能评价指标研究[J]. 建设科技，2023(4)：34-38.

[27] 孙可欣，范蕊，步婷，等. 夏热冬冷地区办公建筑用能源总线系统夏季运行特性研究[J]. 建筑科学，2022，38(4)：25-36.

[28] 张驰，郭海鞍，孟杰，等. 工业建筑绿色低碳化改造再利用设计方法研究：以夏热冬冷地区为例[J]. 南方建筑，2024(7)：22-35.

[29] 廖剑辉. 高性能UPS电源在公共建筑电气的应用[J]. 智能建筑与智慧城市，2025(增刊1)：195-197.

[30] 孙丙香，任鹏博，陈育哲，等. 锂离子电池在不同区间下的衰退影响因素分析及任意区间的老化趋势预测[J]. 电工技术学报，2021，36(3)：666-674.

[31] 范智伟，乔丹，崔海港. 锂离子电池充放电倍率对容量衰减影响研究[J]. 电源技术，2020，44(3)：325-329.

[32] 刘健辰，刘山林. 基于二阶锥松弛和Big-M法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术，2018，42(8)：2604-2611.

[33] 于维珂，汪涛，杨尘. 储能用锂离子电池充放电能量效率的影响因素[J]. 电池，2020，50(6)：552-555.