考虑电动汽车移动储能特性的智能楼宇群能量管理方法

胡寰宇，艾　欣，胡俊杰，王坤宇
（华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206）

摘要：考虑电动汽车在不同建筑之间的移动性及其与多建筑之间具有的功率交互能力，提出一种基于电动汽车移动储能共享特性的两阶段智能楼宇群能量管理方法。以区域内互联的智能楼宇群为研究场景，考虑分布式可再生能源与楼宇基荷的不确定性，利用随机规划方法建立了含电动汽车移动储能特性的楼宇群运行成本最低的上层优化模型。基于上层优化确定的电动汽车在不同楼宇的能量分配，下层从楼宇群供需平衡的角度，利用分布式算法建立了含灵活资源调度成本、传输损耗的楼宇总运行成本最低的自治模型。算例结果表明，所提的模型及策略可以促进能源互补，提升楼宇群运行经济性及可再生能源利用效率，为高比例分布式可再生能源的并网消纳与平衡问题提供新的解决思路。

关键词：电动汽车；能量管理；电能共享；移动储能；需求侧灵活性；智能楼宇
中图分类号：TM 73；U 469.72　　**文献标志码**：A　　DOI：10.16081/j.epae.202208030

0　引言

“双碳”战略目标促使可再生能源飞速发展，而可再生能源利用效率的低下成为电网向新型电力系统转型的主要制约[1]。另外，占全球能源消耗比例高达35%的建筑物已成为全球温室气体排放的主要来源[2]，近年来围绕楼宇能量管理的问题广受关注。配备柔性负荷、分布式可再生能源或储能资源的智能楼宇属于典型的产消者[3]，但功能属性、配置情况的差异使楼宇的能源利用模式各异，通过能量管理优化楼宇内部的能量互补提升空间较小。相反地，楼宇间的能源优化互补具有提高整体运行效率的可能，是促进楼宇向近零能耗模式下发展、减轻配电网运行管理压力的途径[4]。

目前，已有工作对产消者交互运行进行了综述[5]。交互运行技术与理念中，能源共享由于具有资源优化配置及利用的能力受到学者的广泛关注[6-9]。文献[6]提出了一种多能源互联微网群的能源共享模式，利用交替乘子法解决了电、热能源共享的平衡问题；文献[7]建立了大规模互联直流纳网的实时交易模型，利用李雅普诺夫优化理论解决了计算效率问题；文献[8]基于改进的拍卖理论提出了一种能源共享交易出清的办法，能够激励差异的相容性及个体交易理性；文献[9]针对共享分布式能源的市场化服务机制开展了研究，设计了园区分布式能源共享服务的架构和业务流程，能够促进分布式能源能效、设备整体利用率的提升。当前围绕能源共享的研究聚焦产消者的整体外特性差异，鲜有文献考虑产消者内部资源动态变化对交互运行的影响。电动汽车EV（Electric Vehicle）作为典型的灵活性资源，由于具有响应速度快、电能双向流动V2G（Vehicle to Grid）的特点广受关注[10]，实际上，移动的EV能够动态接入不同的楼宇产消者，EV的移动性为楼宇产消者群提供了一种虚拟的共享网络。截至当前，基于EV移动性的充放电优化研究极少，模型匮乏且概念不统一。国内有学者提出EV的移动储能特性[11-13]：文献[11]建立了一种基于停车生成率的EV移动储能模型，由区域的宏观停放视角对EV的流动特征进行捕捉，提出了EV移动储能与可再生能源协调的V2G策略；文献[12-13]建立了基于移动储能特性的EV辅助服务优化模型，提出了EV参与电网一次、二次调频的控制策略。上述研究刻画了EV在不同区域的移动特征，但忽略了能量在区域间传输的潜力。国外有学者提出EV的电能矢量特性[14-16]：Bunomano的团队对EV的电能矢量特性在建筑间的应用进行了分析；文献[14]提出了车-建筑-车V2B²（Building to Vehicle to Building）概念，即利用EV的移动储能特性实现可再生能源在不同建筑间的搬运，以提升可再生能源就地消纳比例；文献[15]在前者的基础上针对场景及资源交互运行优化模型的参数设置进行了分析；文献[16]基于研究分析了V2B²场景下建筑配置分布式可再生能源的规划问题。文献[17]基于通勤EV的多地点充电场景，研究了由EV耦合住宅-办公楼构成的虚拟微电网优化调度问题。上述研究利用EV在不同建筑的移动接入特性，拓展了一种虚拟聚合的建筑群研究视角，上述工作的不足在于研究场景的简单且单一，

收稿日期：2022-05-31；**修回日期**：2022-08-07
在线出版日期：2022-08-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52177080）；北京市科技新星计划项目（Z201100006820106）
Project supported by the National Natural Science Foundation of China（52177080） and Beijing Nova Program（Z201100006820106）

仅考虑了单台EV在一间住宅与一间办公室的能量交互。综上所述,已有大量的工作开始探索EV的移动储能能力,但传统研究中EV的灵活性局限于夜间充电的假设[18],始终忽略了EV于日间并网具有的V2G潜力,当前的充放电模型无法处理EV多行程场景的优化。同时,研究EV移动储能特性下楼宇产消者交互运行的文献较少,V2B²概念下EV集群与楼宇产消者群的互动特性值得深入研究。

因此,本文将能量共享与EV的移动储能特性相结合,研究基于EV移动储能共享网络的互联智能楼宇群协调优化的问题,旨在挖掘需求侧灵活性潜力进而提高可再生能源利用效率。首先,对EV的移动储能特性进行了分析与建模;其次,利用集中式优化计算楼宇群在EV移动共享网络中的最佳能量分配策略;然后,利用分布式优化确定楼宇群基于互联共享网络的最佳能量管理策略;最后,通过算例结果验证了本文提出的两阶段协调优化方法可提高楼宇群经济性及可再生能源利用效率。

1 智能楼宇群的协调运行框架

图1展示了智能楼宇群的协调运行框架。智能楼宇群通过电力与通信网络相互连接。图中,HVAC、ESS、EMS分别为供暖通风与空气调节、固定储能系统、能量管理系统。在日前优化调度过程中,由于独立的楼宇产消者容量较小,引入智能楼宇群代理商作为楼宇与电网能量互动的第三方,基于外部市场电价协调楼宇间的电能共享交易,监管楼宇间的共享电量平衡,进而完成楼宇群整体功率计划与外部市场的交互。智能楼宇首先确定与EV的电能交互:由EV移动接入构成耦合关系的楼宇将自身运行情况上报给代理商,代理商根据楼宇群运行特性协调EV在不同楼宇的充电能量需求,最大化楼宇群消纳可再生能源的能力。完成EV的充电能量分配后,智能楼宇的EMS结合内部资源调度的成本制定最优的功率分配计划并上报,包括期望共享的电量。代理商收到各楼宇的共享电量并下发引导信号使楼宇在共享网络中的电力达到平衡。最终,两

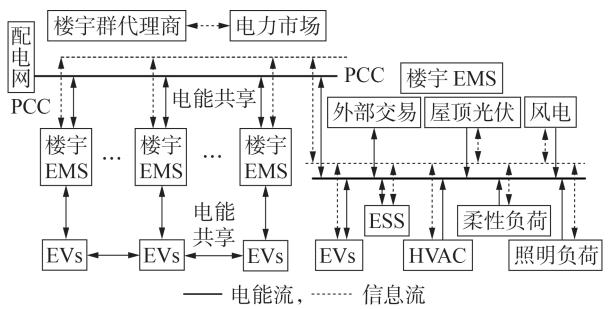


图1 智能楼宇群的协调运行框架

Fig.1 Coordinated operation framework of smart building clusters

阶段共享完成后的电能缺口或富余由外部电网按市场价格结清,实现智能楼宇群与电网的最终电能平衡。

2 EV移动储能特性的分析与建模

2.1 EV移动储能特性分析

通过出行链模型,EV出行与停放的时间和空间规律可以上报给代理商[10]。基于移动储能特性的EV模型主要应刻画出EV在多行程下的充放电可行域关联性。由图2所示的EV移动储能建模示意图,随机设置一辆通勤EV进行移动储能特性分析,其移动特性体现于日内在工作与住宅的往返。假设该EV白天由住宅楼宇出发到达工作楼宇并停放至工作结束,傍晚下班由工作楼宇返回住宅楼宇,在住宅楼宇夜间停放直至次日上班。因此,移动储能特性的优势主要体现在全局视角下的充放电优化,通过充放电可行域关联性的刻画,可以实现2栋楼内部资源的联合优化。由EV充电能量的分配变化触发楼宇内部资源运行特性的改变,将EV充放电由传统的时间优化升级为时空优化,挖掘EV的充放电灵活性潜力。

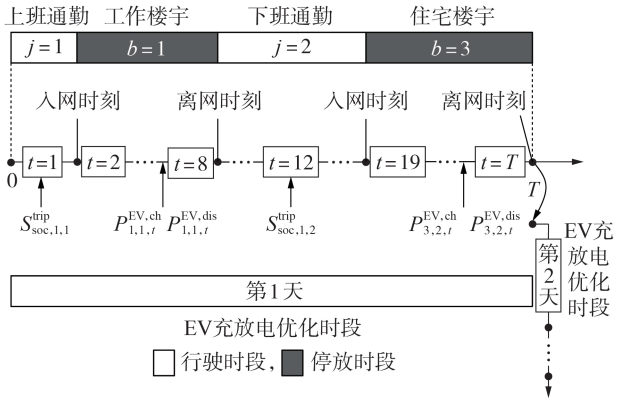


图2 EV移动储能建模示意图

Fig.2 Schematic diagram of EV mobile energy storage modelling

因此,本文对EV移动储能特性的建模思路为:基于历史统计数据预测EV多行程下的入网、离网时刻,分别建立EV并网时段的充放电负荷模型,将入网、离网的电池荷电量设置为决策变量;基于行驶信息,构建EV前序时段离网电量与后序时段并网电量的约束,实现EV充放电优化在全局内的能量供需平衡。

2.2 EV移动储能特性建模

本节主要介绍EV移动储能模型。变量下标说明如下(下文不再赘述):b表示楼宇编号;t表示时段编号;j表示EV编号;Δt表示时间间隔;r表示柔性设备的编号;g表示ESS的编号;考虑EV的移动特性,由下标u表示出行编号;考虑分布式可再生能源

及基荷的预测不确定性，由下标s表示场景编号。此外，模型中引入了一组控制变量δ来表示必要的逻辑约束，如附录A表A1所示。

$$\sigma_{b,t}=\begin{cases}1 & \text{EV 接入智能楼宇}\\ 0 & \text{EV 处于行驶状态}\end{cases} \tag{1}$$

$$\delta^{1}_{s,b,j,t}+\delta^{2}_{s,b,j,t}\leqslant 1 \tag{2}$$

$$0\leqslant P^{\mathrm{EV,ch}}_{s,b,j,t}\leqslant \delta^{1}_{s,b,j,t}\sigma_{b,t}P^{\mathrm{EV,max}}_{b,j,t} \tag{3}$$

$$0\leqslant P^{\mathrm{EV,dis}}_{s,b,j,t}\leqslant \delta^{2}_{s,b,j,t}\sigma_{b,t}P^{\mathrm{EV,min}}_{b,j,t} \tag{4}$$

$$S^{\mathrm{EV,min}}_{\mathrm{soc},j}\leqslant S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},s,b,j,t}\leqslant S^{\mathrm{EV,max}}_{\mathrm{soc},j} \tag{5}$$

式中：$P^{\mathrm{EV,ch}}_{s,b,j,t}$、$P^{\mathrm{EV,dis}}_{s,b,j,t}$分别为EV的充、放电功率；$P^{\mathrm{EV,max}}_{b,j,t}$、$P^{\mathrm{EV,min}}_{b,j,t}$分别为EV的充电、放电功率边界；$S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},s,b,j,t}$为荷电状态；$S^{\mathrm{EV,max}}_{\mathrm{soc},j}$、$S^{\mathrm{EV,min}}_{\mathrm{soc},j}$分别为充放电过程中电池允许的荷电状态运行上、下限。式(1)—(5)描述了EV在全时段的功率及能量可行范围。

$$S^{\mathrm{trip}}_{\mathrm{soc},b,j}=\frac{D_{j,u}W^{\mathrm{EV}}_{j}}{(t_{\mathrm{a},u}-t_{\mathrm{a},u-1}-t_{\mathrm{l},u}+1)E^{\mathrm{EV}}_{b,j}} \tag{6}$$

式中：$D_{j,u}$、W^{EV}_{j}分别为EV的行驶距离、单位里程耗电量；$E^{\mathrm{EV}}_{b,j}$为EV电池的额定容量；$t_{\mathrm{a},u}$、$t_{\mathrm{l},u}$分别为EV的入网时段、并网时段长度。式(6)描述了EV移动状态下的放电过程。

$$S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},s,b,j,t+1}=S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},s,b,j,t}-(1-\sigma_{b,t})S^{\mathrm{trip}}_{\mathrm{soc},b,j}+\frac{\Delta t}{E^{\mathrm{EV}}_{b,j}}\left(\eta^{\mathrm{EV,ch}}_{b,j}P^{\mathrm{EV,ch}}_{s,b,j,t}-\frac{P^{\mathrm{EV,dis}}_{s,b,j,t}}{\eta^{\mathrm{EV,dis}}_{b,j}}\right) \tag{7}$$

$$S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},b,j,T}\geqslant S^{\mathrm{EV,exp}}_{\mathrm{soc},b,j} \tag{8}$$

$$\sum_{t=t_{\mathrm{a},u}}^{t_{\mathrm{l},u}}\frac{\Delta t}{E^{\mathrm{EV}}_{b,j}}\left(\eta^{\mathrm{EV,ch}}_{b,j}P^{\mathrm{EV,ch}}_{s,b,j,t}-\frac{P^{\mathrm{EV,dis}}_{s,b,j,t}}{\eta^{\mathrm{EV,dis}}_{b,j}}\right)\geqslant 0 \tag{9}$$

式中：$\eta^{\mathrm{EV,ch}}_{b,j}$、$\eta^{\mathrm{EV,dis}}_{b,j}$分别为EV充电、放电模式下电能转换效率；$S^{\mathrm{EV,exp}}_{\mathrm{soc},b,j}$为EV次日离网的期望荷电状态；$T$=24 h，为总调度时长。式(9)约束了EV在电能共享阶段的最小荷电状态，考虑用户后序时段出行的里程焦虑，不允许EV牺牲荷电状态追求楼宇间的经济效益。当式(9)为0时说明EV在并网结束时未带走楼宇能量，仅提供了功率调节服务，保证了用户后序时段出行不低于协调控制前的电量。EV前序时段离网电量与后序时段并网电量的约束由式(10)实现。

$$S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},b,j,t_{\mathrm{a},u}}=S^{\mathrm{EV}}_{\mathrm{soc},q,j,t_{\mathrm{a},u-1}+t_{\mathrm{l},u-1}}-D_{j,u}W^{\mathrm{EV}}_{j}\quad q\in\{1,2,\cdots,N_b\}\text{且}\,q\neq j \tag{10}$$

式中：N_b为智能楼宇数量。

3　智能楼宇资源模型

3.1　HVAC模型

根据文献[19]提出的HVAC二阶状态模型，热动态过程可描述为：

$$\delta^{3}_{s,b,t}P^{\mathrm{HVAC,min}}_{b,t}\leqslant P^{\mathrm{HVAC}}_{s,b,t}\leqslant \delta^{3}_{s,b,t}P^{\mathrm{HVAC,max}}_{b,t} \tag{11}$$

$$\theta^{\mathrm{in}}_{s,b,t+1}=\theta^{\mathrm{in}}_{s,b,t}+\varepsilon_b^{-1}[G_b(\theta^{\mathrm{out}}_{b,t}-\theta^{\mathrm{in}}_{s,b,t})-P^{\mathrm{HVAC}}_{s,b,t}]\Delta t \tag{12}$$

$$\theta^{\mathrm{in,min}}_{b,t}\leqslant\theta^{\mathrm{in}}_{s,b,t}\leqslant\theta^{\mathrm{in,max}}_{b,t} \tag{13}$$

式中：$P^{\mathrm{HVAC}}_{s,b,t}$为HVAC的功率；$P^{\mathrm{HVAC,max}}_{b,t}$、$P^{\mathrm{HVAC,min}}_{b,t}$分别为HVAC允许运行的功率上、下限；$\theta^{\mathrm{in}}_{s,b,t}$、$\theta^{\mathrm{out}}_{b,t}$分别为室内、室外温度；$\theta^{\mathrm{in,max}}_{b,t}$、$\theta^{\mathrm{in,min}}_{b,t}$分别为用户设定的舒适室温上、下限；$\varepsilon_b^{-1}$、$G_b$分别为热质、热导参数。式(13)表示HVAC的温度边界，描述了HVAC功率调节的最大可行空间。

3.2　功率转移柔性负荷模型

住宅楼宇中存在如洗衣机、电磁炉等家用负荷可作为功率转移柔性负荷参与能量管理优化。功率转移柔性负荷模型如下：

$$P^{\mathrm{FL}}_{s,b,t}=\sum_{r=1}^{N_r}\delta^{4}_{s,b,r,t}P^{\mathrm{FL,rate}}_{s,b,r,t} \tag{14}$$

$$\delta^{4}_{s,b,r,t}-\delta^{4}_{s,b,r,t-1}=\delta^{\mathrm{on}}_{s,b,r,t-1}-\delta^{\mathrm{off}}_{s,b,r,t-1} \tag{15}$$

$$\delta^{\mathrm{on}}_{s,b,r,t}+\delta^{\mathrm{off}}_{s,b,r,t}\leqslant 1 \tag{16}$$

$$\sum_{m=T^{\mathrm{start}}_{s,b,r}}^{\min(T,T^{\mathrm{end}}_{s,b,r}-1)}\delta^{4}_{s,b,r,m}\geqslant 1 \tag{17}$$

$$\delta^{\mathrm{on}}_{s,b,r,t}+\sum_{m=t+1}^{\min(T,t+T^{\mathrm{on,min}}_{s,b,r}-1)}\delta^{\mathrm{off}}_{s,b,r,m}\leqslant 1\quad t\in\Gamma_{s,b,r} \tag{18}$$

式中：N_r为楼宇中柔性负荷的数量；$P^{\mathrm{FL,rate}}_{s,b,r,t}$为柔性负荷单元的额定用电功率；$T^{\mathrm{on,min}}_{s,b,r}$为柔性负荷单元最小连续工作时长；$\Gamma_{s,b,r}=\left[T^{\mathrm{start}}_{s,b,r},T^{\mathrm{end}}_{s,b,r}\right]$为用户设定的期望工作时段范围，描述了功率转移的时间灵活性空间，$T^{\mathrm{start}}_{s,b,r}$、$T^{\mathrm{end}}_{s,b,r}$分别为期望工作时段的起、止时间。式(15)—(17)表示工作开始区间及最小连续工作时间的约束。

3.3　ESS模型

ESS模型如下：

$$\delta^{5}_{s,b,t}+\delta^{6}_{s,b,t}\leqslant 1 \tag{19}$$

$$0\leqslant P^{\mathrm{ESS,ch}}_{s,b,t}\leqslant\delta^{5}_{s,b,t}P^{\mathrm{ESS,max}}_{b,t} \tag{20}$$

$$0\leqslant P^{\mathrm{ESS,dis}}_{s,b,t}\leqslant\delta^{6}_{s,b,t}P^{\mathrm{ESS,min}}_{b,t} \tag{21}$$

$$S^{\mathrm{ESS,min}}_{\mathrm{soc},b}\leqslant S^{\mathrm{ESS}}_{\mathrm{soc},s,b,t}\leqslant S^{\mathrm{ESS,max}}_{\mathrm{soc},b} \tag{22}$$

$$S^{\mathrm{ESS}}_{\mathrm{soc},s,b,t+1}=\frac{\Delta t}{E^{\mathrm{ESS}}_{b}}\left(\eta^{\mathrm{ESS,ch}}_{b}P^{\mathrm{ESS,ch}}_{s,b,t}-\frac{P^{\mathrm{ESS,dis}}_{s,b,t}}{\eta^{\mathrm{ESS,dis}}_{b}}\right)+S^{\mathrm{ESS}}_{\mathrm{soc},s,b,t} \tag{23}$$

$$S^{\mathrm{ESS}}_{\mathrm{soc},b,0}=S^{\mathrm{ESS}}_{\mathrm{soc},b,T} \tag{24}$$

式中：$\eta^{\mathrm{ESS,ch}}_{b}$、$\eta^{\mathrm{ESS,dis}}_{b}$分别为ESS充电、放电模式下电能转换效率；$P^{\mathrm{ESS,ch}}_{s,b,t}$、$P^{\mathrm{ESS,dis}}_{s,b,t}$分别为ESS提供的充、放电功率；$P^{\mathrm{ESS,max}}_{b,t}$、$P^{\mathrm{ESS,min}}_{b,t}$分别为ESS的充、放电功率边界；$S^{\mathrm{ESS}}_{\mathrm{soc},s,b,t}$为荷电状态；$S^{\mathrm{ESS,max}}_{\mathrm{soc},b}$、$S^{\mathrm{ESS,min}}_{\mathrm{soc},b}$分别为充放电过程中电池允许的荷电状态运行上、下限；T为优化周期。式(24)确保了ESS在调度周期起止时段的能量平衡。

3.4　可再生能源与基础负荷的不确定性模型

为了较好地考虑可再生能源和负荷对智能楼宇运行的影响，本文考虑了小规模风机、屋顶光伏系统及基荷的不确定性，光伏系统、风机系统及基荷的实际功率可以分别表示为：

$$P^{\mathrm{PVS,orig}}_{s,b,t}=P^{\mathrm{PVS,orig}}_{b,t}+P^{\mathrm{PVS,err}}_{s,b,t} \tag{25}$$

$$P_{s,b,t}^{\mathrm{WTS,orig}}=P_{b,t}^{\mathrm{WTS,orig}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{WTS,err}} \tag{26}$$

$$P_{s,b,t}^{\mathrm{BL,orig}}=P_{b,t}^{\mathrm{BL,orig}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{BL,err}} \tag{27}$$

式中：$P_{b,t}^{\mathrm{PVS,orig}}$、$P_{b,t}^{\mathrm{WTS,orig}}$、$P_{b,t}^{\mathrm{BL,orig}}$分别为光伏、风电、基荷的预测值；$P_{s,b,t}^{\mathrm{PVS,err}}$，$P_{s,b,t}^{\mathrm{WTS,err}}$、$P_{s,b,t}^{\mathrm{BL,err}}$分别为场景$s$下的光伏、风电及基荷的预测误差。

本文利用Monte Carlo抽样及K-means聚类生成典型场景集及场景发生概率[20]以表征不确定性。考虑不同楼宇配置可再生能源的种类不同，为方便建模，故设置$P_{s,b,t}^{\mathrm{DRERs}}$统一表示楼宇在任一场景下的可再生能源出力，详细模型如式(28)所示。

$$P_{s,b,t}^{\mathrm{DRERs}}=P_{s,b,t}^{\mathrm{PVS,orig}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{WTS,orig}} \tag{28}$$

4 智能楼宇群的双层优化模型

本节将依次介绍上、下层模型，包括目标函数的组成、各主体的功率平衡约束，建模以日前优化应用视角展开。上层模型中，代理商主要考虑EV出行信息、楼宇内部资源运行信息及外部电价的预测信息。通过优化EV在不同楼宇的充放电能量分配，实现楼宇群内部资源运行特性的调整，优化整体运行的成本。下层模型中，各楼宇根据上层优化确定的EV能量需求，结合内部资源调度成本、电能共享损耗及外部电网交易成本，建立楼宇总运行成本最低的自治优化模型，获得楼宇内部运行与外部交易的最优功率计划。

4.1 考虑EV移动储能共享的楼宇群上层模型

4.1.1 目标函数

本文采用随机规划[21]解决分布式可再生能源与基荷的不确定性，结合对可再生能源及基荷的不确定性表征，实现楼宇群期望总运行成本最低的优化。运行成本包括移动储能特性下EV的充放电优化成本和楼宇群与外部电网的交易成本，分别如式(29)—(31)所示。

$$\min\ C=\sum_{s=1}^{N_s}\sum_{t=1}^{T}\pi_s\left(C_{s,t}^{\mathrm{MES}}+C_{s,t}^{\mathrm{grid}}\right) \tag{29}$$

$$C_{s,t}^{\mathrm{grid}}=\Delta t\sum_{b=1}^{N_b}\left(c_t^{\mathrm{bg}}P_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}-c_t^{\mathrm{sg}}P_{s,b,t}^{\mathrm{sgrid}}\right) \tag{30}$$

$$C_{s,t}^{\mathrm{MES}}=\Delta t\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev}}}\left(c_t^{\mathrm{bg}}P_{s,j,t}^{\mathrm{EV,ch}}-c_t^{\mathrm{sg}}P_{s,j,t}^{\mathrm{EV,dis}}\right) \tag{31}$$

式中：π_s为场景发生概率；C为考虑EV移动储能共享的楼宇群期望总运行成本；$C_{s,t}^{\mathrm{grid}}$、$C_{s,t}^{\mathrm{MES}}$分别为楼宇群与外部电网的交易成本、移动储能特性下EV的充放电优化成本；c_t^{bg}、c_t^{sg}分别为外部电网的购、售电价；$P_{s,b,t}^{\mathrm{sgrid}}$、$P_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}$分别为楼宇群通过代理商期望与外部电网的售、购电功率；N_s、N_{ev}分别为场景集合数、区域内EV总数。式(29)—(31)描绘了EV与楼宇群运行的整体经济性。

4.1.2 功率平衡与功率限制约束

场景s中各智能楼宇在t时段的功率平衡约束见式(32)，其表示楼宇内部资源功率的实时平衡。

$$P_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{DRERs}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{ESS,dis}}+\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev}}}P_{s,b,j,t}^{\mathrm{EV,dis}}=P_{s,b,t}^{\mathrm{sgrid}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{BL,orig}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{ESS,ch}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{FL}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{HVAC}}+\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev}}}P_{s,b,j,t}^{\mathrm{EV,ch}} \tag{32}$$

代理商同外部电网交易的峰值功率约束为：

$$-P^{\mathrm{grid,max}}\leqslant\sum_{b=1}^{N_b}\left(P_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}+P_{s,b,t}^{\mathrm{sgrid}}\right)\leqslant P^{\mathrm{grid,max}} \tag{33}$$

式中：$P^{\mathrm{grid,max}}$为交易的功率最大值。

综上所述，上层优化调度模型的目标为式(29)，模型约束包含式(1)—(28)、(32)表示的智能楼宇内部资源的运行约束以及式(33)表示的楼宇群运行约束，采用混合整数线性规划方法可以求解。

4.2 考虑楼宇电能共享的楼宇能量管理优化模型

4.2.1 目标函数

基于互联电网的电能共享策略，智能楼宇群能量管理可通过楼宇间的互联线路进行能量交易，以减少与外部电网的直接交互，从而进一步最小化总运行成本，如式(34)所示，其刻画了基于电能共享策略下楼宇运行的整体经济性。式(35)描述了电化学储能充放电损耗的通用模型，由电池退化[16]及循环老化[22]两部分组成，平衡EV协调优化时的收益与调控成本。

$$\min\ C^{\mathrm{BEMSs}}=\sum_{s=1}^{N_s}\sum_{b=1}^{N_b}\sum_{t=1}^{T}\pi_s\left(C_{s,b,t}^{\mathrm{EV}}+C_{s,b,t}^{\mathrm{ESS}}+C_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}+\gamma_{s,b,t}\right) \tag{34}$$

$$\gamma_{s,b,t}=\alpha^{\mathrm{exa}}\left(P_{s,b,t}^{\mathrm{exa}}\right)^2\Delta t$$

$$c_{s,b,t}^{\mathrm{EV/ESS}}=\frac{c^{\mathrm{bat}}}{E_b^{\mathrm{EV/ESS}}}\left[\frac{P_{s,b,t}^{\mathrm{EV/ESS,dis}}}{\eta_b^{\mathrm{dis}}L_b^{\mathrm{cyc}}d_b^{\mathrm{DoD}}}+\frac{\Delta tG_b^{\mathrm{de}}}{20\,\%}\left(\eta_b^{\mathrm{ch}}P_{s,b,t}^{\mathrm{EV/ESS,ch}}-\frac{P_{s,b,t}^{\mathrm{EV/ESS,dis}}}{\eta_b^{\mathrm{dis}}}\right)\right] \tag{35}$$

$$C_{s,b,t}^{\mathrm{EV}}=\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev}}}c_{s,b,j,t}^{\mathrm{EV}}$$

$$C_{s,b,t}^{\mathrm{ESS}}=\sum_{g=1}^{N_{\mathrm{ess}}}c_{s,b,g,t}^{\mathrm{ESS}}$$

$$C_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}=\Delta t\left(c_t^{\mathrm{bg}}P_{s,b,t}^{\mathrm{bg}}-c_t^{\mathrm{sg}}P_{s,b,t}^{\mathrm{sg}}\right)$$

式中：C^{BEMSs}为考虑楼宇电能共享的楼宇群运行总成本，其包括EV协调优化产生的电池损耗成本$C_{s,b,t}^{\mathrm{EV}}$、固定储能充放电产生的电池损耗成本$C_{s,b,t}^{\mathrm{ESS}}$、期望与外部电网交易的成本$C_{s,b,t}^{\mathrm{bgrid}}$、通过区域内互联线路进行电能共享产生的损耗成本$\gamma_{s,b,t}$；$c_{s,b,j,t}^{\mathrm{EV}}$和$c_{s,b,g,t}^{\mathrm{ESS}}$通过式(35)计算获得；$\alpha^{\mathrm{exa}}$为楼宇之间的配电线路损耗；$E_b^{\mathrm{EV/ESS}}$为EV或储能电池的额定容量；$N_{\mathrm{ess}}$为楼宇内ESS的总数；$c^{\mathrm{bat}}$为EV与ESS的电池投资成本；$L_b^{\mathrm{cyc}}$、$d_b^{\mathrm{DoD}}$、$G_b^{\mathrm{de}}$分别为电池的总充放电循环次数、放电深度、退化因子；$P_{s,b,t}^{\mathrm{exa}}$为楼宇之间电能共享的功率。

4.2.2　功率平衡与功率限制约束

基于电能共享策略，场景s中各智能楼宇的功率约束应由式(32)替换为式(36)。

$$\left(P_{s,b,t}^{\text{short}}-P_{s,b,t}^{\text{sur}}\right)+P_{s,b,t}^{\text{DRERs}}+P_{s,b,t}^{\text{ESS,dis}}+\sum_{j=1}^{N_{\text{ev}}}P_{s,b,j,t}^{\text{EV,dis}}=P_{s,b,t}^{\text{BL,orig}}+P_{s,b,t}^{\text{ESS,ch}}+P_{s,b,t}^{\text{FL}}+P_{s,b,t}^{\text{HVAC}}+\sum_{j=1}^{N_{\text{ev}}}P_{s,b,j,t}^{\text{EV,ch}} \tag{36}$$

楼宇与外部电网及其他楼宇之间的功率可描述为下列形式：

$$P_{s,b,t}^{\text{short}}=P_{s,b,t}^{\text{bb}}+P_{s,b,t}^{\text{bg}}$$
$$P_{s,b,t}^{\text{sur}}=P_{s,b,t}^{\text{sb}}+P_{s,b,t}^{\text{sg}}$$

式中：$P_{s,b,t}^{\text{short}}$、$P_{s,b,t}^{\text{sur}}$分别为楼宇共享后的功率缺口、富余；$P_{s,b,t}^{\text{bg}}$、$P_{s,b,t}^{\text{sg}}$分别为智能楼宇向外部电网的购、售电功率；$P_{s,b,t}^{\text{bb}}$、$P_{s,b,t}^{\text{sb}}$分别为智能楼宇之间的电能共享购、售电功率。

式(37)描述了智能楼宇与其他楼宇的电能共享最终交换功率值。

$$P_{s,b,t}^{\text{exa}}=P_{s,b,t}^{\text{bb}}-P_{s,b,t}^{\text{sb}} \tag{37}$$

最终，智能楼宇之间的电能共享功率平衡可表示为：

$$\sum_{b=1}^{N_b}P_{s,b,t}^{\text{exa}}=0 \tag{38}$$

各楼宇之间相连线路的电力容量约束如式(39)和式(40)所示。

$$0\leqslant P_{s,b,t}^{\text{bb}}\leqslant\delta_{s,b,t}^{7}P_{b,t}^{\text{grid,max}} \tag{39}$$

$$0\leqslant P_{s,b,t}^{\text{sb}}\leqslant\left(1-\delta_{s,b,t}^{7}\right)P_{b,t}^{\text{grid,max}} \tag{40}$$

除式(9)所示的约束外，本文采用大M法增添以下约束来确保潮流方向。

$$0\leqslant P_{s,b,t}^{\text{bg}}\leqslant\delta_{s,b,t}^{8}M \tag{41}$$

$$0\leqslant P_{s,b,t}^{\text{sg}}\leqslant\left(1-\delta_{s,b,t}^{8}\right)M \tag{42}$$

假设楼宇群中存在楼宇k不与其他楼宇互联，或者退出电能共享交易时，需添加以下约束：

$$P_{s,k,t}^{\text{bb}}=0 \tag{43}$$

$$P_{s,k,t}^{\text{sb}}=0 \tag{44}$$

综上所述，下层楼宇群能量管理优化模型的目标为式(34)，模型约束包含式(1)—(28)、(36)表示的智能楼宇内部资源运行约束以及式(37)—(44)表示的楼宇间电能共享运行约束，构成了标准混合整数线性规划模型。

4.2.3　基于对偶分解法的分布式优化模型

参与电能共享交易的楼宇群需要交换运行功率信息，为了保护楼宇内部信息的隐私安全，采取对偶分解法[23]将楼宇群集中式优化模型式(34)转化为交互式操作的求解方法。首先，引入拉格朗日乘子向量$\boldsymbol{\lambda}$处理楼宇间的耦合约束式，将优化模型转换为拉格朗日形式，如式(45)所示。

$$\begin{cases}\max\ L\left(\boldsymbol{\lambda},P_{s,b,t}^{\text{bg}},P_{s,b,t}^{\text{sg}},P_{s,b,j,t}^{\text{EV}},P_{s,b,t}^{\text{ESS}},P_{s,b,t}^{\text{exa}}\right)=\\ \qquad C^{\text{BEMSs}}+\sum_{b=1}^{N_b}\sum_{t=1}^{T}\lambda_{s,t}^{\text{exa}}P_{s,b,t}^{\text{exa}}\\ \text{s.t.}\quad \text{式(1)—(28)、(36)—(44)}\end{cases} \tag{45}$$

式中：$\lambda_{s,t}^{\text{exa}}$为等式约束式(38)的对偶乘子变量，表示电能共享的交易价格。

对偶优化模型式(45)可拆解为N_b个子问题，由各栋楼宇独立求解自身总运营成本最低为目标的子优化模型。其中，各楼宇的总运行成本优化模型目标函数可描述为：

$$\min\ C_b^{\text{BEMSs}}=\sum_{s=1}^{N_s}\sum_{t=1}^{T}\pi_s\left(C_{s,b,t}^{\text{grid}}+C_{s,b,t}^{\text{EV}}+C_{s,b,t}^{\text{ESS}}+\gamma_{s,b,t}\right)+\sum_{t=1}^{T}\lambda_{s,t}^{\text{exa}}P_{s,b,t}^{\text{exa}} \tag{46}$$

本文采用对偶次梯度DSG(Dual Sub-Gradient)算法计算，迭代过程中的引导信号如下：

$$\lambda_{s,t}^{\text{exa}}(\omega+1)=\lambda_{s,t}^{\text{exa}}(\omega)+\alpha_{s,t}^{\omega}\sum_{b=1}^{N_b}P_{s,b,t}^{\text{exa},*} \tag{47}$$

式中：ω为交互迭代次数；$P_{s,b,t}^{\text{exa},*}$为优化模型式(46)的最优解；$\alpha_{s,t}^{\omega}$为迭代步长。在本文算例中，每个场景的原始残差都被用作DSG算法的收敛标准，以保证满足式(48)。

$$\left|P_{s,b,t}^{\text{exa},*}(\omega)-P_{s,b,t}^{\text{exa},*}(\omega-1)\right|\leqslant\varepsilon^{\text{pri}} \tag{48}$$

式中：ε^{pri}为原始残差的收敛判据。

5　算例分析

5.1　算例参数设置

本文设置5栋相互连接的智能楼宇增加产消者的差异性。智能楼宇的负荷特性及资源配置情况参见附录A表A2。HVAC的参数设置参考了文献[24]，初始温度设置为最舒适区间上界。柔性负荷的额定运行功率设置为1.2 kW。智能楼宇的初始EV及EV移动性如附录A表A3所示。区域内共计有240台EV，容量均为56 kW·h，夏季最大行驶里程为96 km，在20%~95%的荷电状态范围内运行。EV的最大充放电功率为7 kW，效率为0.95。EV在不同楼宇之间的移动及停放时长范围参考了文献[25]并基于Monte Carlo采样进行设置，移动场景预测的方法如附录B的B1部分所示，其场景预测结果如附录B的B2部分所示。为简化计算过程，本文假设EV在调度周期内首次并网电量为75%，次日离网时的期望电量为95%，中间行程的电量随场景优化。EV及储能系统的退化成本参数参考文献[26]进行设置。可再生能源及基荷的数据来源于中国宁夏的典型夏季数据，利用正态分布模拟可再生能源及基荷的预测误差。采用K-means法生成了10个具有代表性的场景，各场景概率如附录C表C1所示，

场景集如附录C图C1—C5所示，楼宇群的室外温度设置如附录C图C6所示。智能楼宇的日前接受电价如图3所示，楼宇群最大可交换容量为10 MW，楼宇之间的线路传输容量为2 000 kW。分布式模型中，共享电价的初值设置为日前购买电价，迭代步长设置为2.5×10^{-5}元/(kW·h)。另外，设置楼宇间的配电线路损耗$\alpha^{exa}=1.2\times10^{-4}$元/(kW²·h)，收敛判据$\varepsilon^{pri}=10^{-6}$。

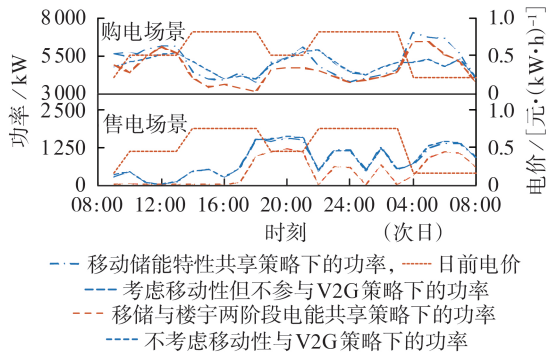


图3 不同场景下代理商功率曲线

Fig.3 Agent power curve in different scenarios

为分析所提模型在日前优化的性能，本文设置日前调度周期为08:00至次日08:00，各时段时长为1 h，预测数据的颗粒度已能够体现各资源在日前优化的功率曲线特性。其中，为了突出本文所提方法的优越性，分别设置了3种比较策略：

1)不考虑EV移动性且不参与V2G的策略；

2)考虑EV移动性但不参与V2G的策略；

3)考虑EV移动性且参与V2G的策略。

在不参与V2G的策略下，EV选择即插即充即走的模式。另外，本文采用不同类型的负荷曲线作为智能楼宇基础负荷，以体现楼宇的运行差异；采用MATLAB下带有Yalmip接口的Gurobi求解器对所提模型进行算例仿真。

5.2 算例结果分析

5.2.1 上层优化结果分析

购电与售电场景下楼宇群代理商的功率曲线对比如图3所示。由图可见：本文所提移动储能共享策略能够更好地调整楼宇群同外部电网的电能交换，从而实现低电价多购入、高电价少购入；在10:00—13:00与次日04:00—08:00时段，移动储能共享策略下园区购入的功率明显更多；在22:00至次日03:00时段，移动储能共享策略下园区购入的功率明显更少；售电场景下，09:00、19:00—21:00与05:00—07:00时段移动储能共享策略下园区售电功率减少，这侧面体现了园区内可再生能源的就地平衡比例的提高。

不同策略下的楼宇群调度成本如表1所示，由表可见本文所提策略能够实现园区预期运行成本最低的目标。

表1 不同策略下楼宇群协调优化成本分析

Table 1 Cost analysis of building cluster optimization under different strategies

策略	成本/元
不考虑EV移动性且不参与V2G的策略	58 466
考虑EV移动性但不参与V2G的策略	59 019
本文策略	54 864

代理商优化EV在不同楼宇的能量分配结果见附录D图D1。其中，图D1(a)、(b)分别为不考虑、考虑移动性的即插即充能量分配情况。对比图D1(a)、(b)与(c)中的智能楼宇1、2的能量分配情况可以发现，EV将智能楼宇2的部分充电能量共享至楼宇1，从而降低了智能楼宇群运行成本。

5.2.2 智能楼宇能量管理结果分析

本节选用场景出行概率最高的场景7对各楼宇的功率平衡结果进行展示，功率分配优化结果如附录D图D2所示。图中，正值表示功耗，负值表示发电。整体对比可以看出，不同楼宇配置情况及基础负荷存在差异，所以功率分配策略也不同。从图D2(a)可以看出：智能楼宇1负荷量较大但波动性不强，其积极参与了电能共享策略买入电能，但在05:00由于充足的光伏发电量转买为卖；同时，不断接入的EV也在积极消纳光伏。从图D2(b)可以看出：智能楼宇2基础负荷峰谷差大，由于灵活性资源匮乏，电能平衡主要通过购电完成，楼宇几乎全天参与了电能共享的购入以降低成本；EV集中于夜间返回充电，由于EV放电损耗成本制约及次日出行的较大能量需求，采取了延迟充电的模式；HVAC经过优化始终维持在温度允许范围的上界，由于设备分散且功率值较小因此在图中不明显。从图D2(c)可以看出：智能楼宇3负荷峰谷差大，由于期望时间范围的约束，柔性负荷在18:00开始工作，已尽可能在光伏发电时段运行；由于光伏发电量充足，智能楼宇在08:00—15:00时段内提供了共享电量，10:00时通过电能共享完成了楼宇间能源交换，剩余的光伏与外部电网交易。从图D2(d)、(e)可以看出：智能楼宇4消纳风电的能力不足，接入的EV积极吸收可再生能源；智能楼宇5在08:00—12:00时段积极调动储能系统先充后放支撑负荷消耗，到达的EV也放电支持负荷消耗。

各楼宇在全部场景下的期望运行成本如表2所示。通过与其他策略下的期望运行成本进行比较可知，本文所提策略能够提高楼宇的经济性。需要说明的是，第一阶段中未考虑楼宇内部资源的调度成本以及共享损耗，所以成本低于第二阶段的优化结果。

表 2　智能楼宇能量管理成本

Table 2　Energy management cost of smart buildings

智能楼宇	期望运行成本 / 元		智能楼宇	期望运行成本 / 元	
	共享	不共享		共享	不共享
1	17352	17564	4	−6672	−6186
2	20291	20896	5	14440	14846
3	14176	14707	楼宇群	59586	61827

5.2.3　迭代过程分析

图 4 展示了场景 7 的共享电能出清价格，不难发现共享电价的趋势与外部电价的趋势相似，且介于外部购售电价之间，如峰电价时段 14:00—19:00，共享电价约为 0.809 1 元 /（kW·h），低于市场购买电价 0.82 元 /（kW·h），这符合市场规则。显然 DSG 算法能够合理出清电能共享交易过程，楼宇也能因共享电价保证其经济利益。

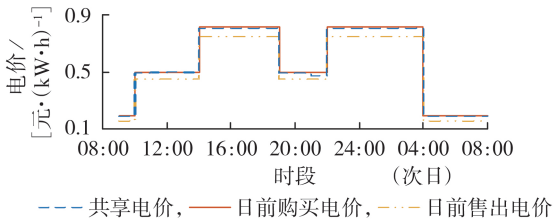


图 4　电能共享的出清电价

Fig.4　Clearing price of electrical power for energy sharing

场景 7 的全时段共享电量的迭代平衡过程如附录 D 图 D3(a)所示，由图可见当迭代次数达到 75 次时电能共享交易已经基本实现收敛。场景 7 在 15:00 的共享电量迭代收敛结果如附录 D 图 D3(b)所示。图中：智能楼宇 2、4、5 在 15:00 的共享购买功率汇聚至 45.569 5 kW，智能楼宇 1 的共享购入功率汇聚至 109.366 8 kW，智能楼宇 3 的共享售出功率汇聚至 246.107 1 kW。因此，本文利用 DSG 算法可以实现分布式计算的快速平衡，各时段的收敛结果清晰可见。

5.2.4　可再生能源就地消纳分析

为了量化楼宇群对可再生能源的就地消纳率，本文建立由式(49)表示的就地消纳指标，经过共享交易后的剩余可再生能源被视作非消纳部分。在上层优化阶段，时段内可再生能源发电功率超出负荷及 EV 消纳的部分为返送电网的剩余能源。经过下层优化后，时段内可再生能源发电功率超出负荷及共享的部分为返送电网的剩余能源。

$$\bar{y}_b^{\mathrm{DRE}}=\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{N_s}\pi_s\max\left(y_b^{\mathrm{DRE}},0\right)}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{N_s}\pi_s P_{s,b,t}^{\mathrm{DRERs}}} \tag{49}$$

$$y_b^{\mathrm{DRE}}=P_{s,b,t}^{\mathrm{DRERs}}-P_{s,b,t}^{\mathrm{BL,orig}}-P_{s,b,t}^{\mathrm{FL}}-P_{s,b,t}^{\mathrm{HVAC}}-P_{s,b,t}^{\mathrm{ESS,ch}}-\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev}}}P_{s,b,j,t}^{\mathrm{EV,ch}}$$

不同策略下楼宇群的可再生能源消纳率如表 3 所示。由表可见，随着移动储能共享策略及楼宇共享策略的实施，楼宇群的可再生能源利用效率不断提升，由不考虑移动性不共享策略至移动储能共享结合楼宇间共享的策略转变，可再生能源就地消纳效率由 83.63 % 提高至 89.13 %，提高了 5.5 %。受限于共享网络的损耗，智能楼宇 4 为保证经济性，共享剩余的风电通过与外部电网交易解决。

表 3　不同策略下可再生能源的就地消纳情况

Table 3　Local consumption of distributed renewable energy under different strategies

第一阶段策略	第二阶段策略	可再生能源消纳率 / %			
		光伏 1	光伏 3	风电 4	平均值
不移动不共享	不共享	98.53	87.20	65.17	83.63
	共享	98.73	87.20	65.41	83.78
移动不共享	不共享	98.86	87.20	66.36	84.14
	共享	98.89	93.63	72.12	88.21
移动共享	不共享	98.74	93.84	72.17	88.25
	共享	99.22	95.20	72.97	89.13

6　结论

本文提出了一种基于 EV 移动储能共享的智能楼宇群协调优化方法，建立了考虑移动储能特性的 EV 充放电负荷模型。算例仿真表明，本文所提的模型和策略能促进楼宇能源互补，提高可再生能源利用效率。本文所得主要结论如下。

1)基于 EV 移动储能特性的有益表现，实现了需求侧灵活性潜力的挖掘。所提出的移动储能充放电模型能处理 EV 多行程场景下的全局优化问题，拓宽了需求侧资源交互运行问题的研究场景。

2)首次将 EV 移动储能特性与电能共享策略相结合，提出了一种考虑 EV 移动储能共享的楼宇群两阶段协调调度优化模型，该模型可优化楼宇能源的互补，同时保证楼宇优化的自治性。

3)本文采用的 DSG 算法能够有效地解决分布式电能共享供需平衡的问题。由算例分析的结果可以看出，EV 的移动储能特性能够促进能源互补，降低楼宇群对主网的依赖性，提高可再生能源的利用效率。

随着楼宇资源配置的丰富及内部资源运行特性差异的扩大，楼宇内用户的用能偏好将趋于多元化且不容忽视。为了进一步提高可再生能源利用效率，未来应从不同时间尺度、不同灵活性资源独特运行特性的视角，结合用户用能偏好对楼宇群的协调优化问题进行研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] 邱伟强，王茂春，林振智，等. “双碳”目标下面向新能源消纳场

景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):244-255.
QIU Weiqiang,WANG Maochun,LIN Zhenzhi,et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):244-255.
[2] THIBANUT A,BRIAN D,JOHN D. Energy climate and change global status report 2017-Towards a zero-emission,efficient,and resilient buildings and construction sector[R]. Pairs,France:UN Environment and International Energy Agency,2017.
[3] THOMAS D,DEBLECKER O,IOAKIMIDIS C S. Optimal operation of an energy management system for a grid-connected smart building considering photovoltaics' uncertainty and stochastic electric vehicles' driving schedule[J]. Applied Energy,2018,210:1188-1206.
[4] WU Wei,SKYE H M. Residential net-zero energy buildings:review and perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,142:110859.
[5] 胡俊杰,王坤宇,艾欣,等. 交互能源:实现电力能源系统平衡的有效机制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):953-965.
HU Junjie,WANG Kunyu,AI Xin,et al. Transactive energy:an effective mechanism for balancing electric energy system[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(4):953-965.
[6] 杨昭,艾欣. 考虑电能共享的综合能源楼宇群分布式优化调度[J]. 电网技术,2020,44(10):3769-3778.
YANG Zhao,AI Xin. Distributed optimal scheduling for integrated energy building clusters considering energy sharing[J]. Power System Technology,2020,44(10):3769-3778.
[7] 樊玮,刘念,张建华. 直流纳网互联运行的在线能量管理方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(1):39-47.
FAN Wei,LIU Nian,ZHANG Jianhua. Online energy management method for operation of interconnected DC nanogrids[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(1):39-47.
[8] TUSHAR W,CHAI Bo,YUEN C,et al. Energy storage sharing in smart grid:a modified auction-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(3):1462-1475.
[9] 李山山,李华强,金智博,等. 基于共享经济理念的园区分布式能源共享服务机制[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):56-71.
LI Shanshan,LI Huaqiang,JIN Zhibo,et al. Distributed energy sharing service mechanism for park based on the concept of sharing economy[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1):56-71.
[10] 崔岩,胡泽春,段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. 电网技术,2022,46(3):981-994.
CUI Yan,HU Zechun,DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charing demands[J]. Power System Technology,2022,46(3):981-994.
[11] 陈中,刘艺,陈轩,等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):77-85.
CHEN Zhong,LIU Yi,CHEN Xuan,et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):77-85.
[12] 鲍谚,姜久春,张维戈,等. 电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):36-43.
BAO Yan,JIANG Jiuchun,ZHANG Weige,et al. Model and control strategy of electric vehicle mobile energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):36-43.
[13] 鲍谚,贾利民,姜久春,等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报,2015,30(11):115-126.
BAO Yan,JIA Limin,JIANG Chunjiu,et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechinical Society,2015,30(11):115-126.
[14] BUONOMANO A. Building to vehicle to building concept:a comprehensive parametric and sensitivity analysis for decision making aims[J]. Applied Energy,2020,101:625-648.
[15] BARONE G,BUONOMANO A,CALISE F,et al. Building to vehicle to building concept toward a novel zero energy paradigm:modelling and case studies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,101:625-648.
[16] BARONE G,BUONOMANO A,FORZANO C,et al. Energy virtual networks based on electric vehicles for sustainable buildings:system modelling for comparative energy and economic analyses[J]. Energy,2022,242:122931.
[17] YU Zhenyu,LU Fei,ZOU Yu,et al. Quantifying energy flexibility of commuter plug-in electric vehicles within a residence-office coupling virtual microgrid. Part Ⅰ:System configuration,quantification framework,and optimization model[J]. Energy and Buildings,2022,254:111551.
[18] 潘振宁,张孝顺,余涛,等. 大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J]. 电力系统自动化,2017,41(16):96-104.
PAN Zhenning,ZHANG Xiaoshun,YU Tao,et al. Hierarchical real-time optimizaed dispatching for large-scale clusters of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(16):96-104.
[19] 冯小峰,林国营,徐青山. 集群空调负荷双层动态优化调度决策方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):29-36.
Feng Xiaofeng,LIN Guoying,XU Qingshan. Bi-level dynamic optimization dispatch decision method for cluster air-conditioning loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):29-36.
[20] 李国庆,陆为华,李赫,等. 基于模糊C-均值聚类的时序概率潮流快速计算方法[J].电力自动化设备,2021,41(4):116-122.
LI Guoqing,LU Weihua,LI He,et al. Fast calculation method of time sequence probabilistic power flow based on fuzzy C-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4):116-122.
[21] 张高航,李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):159-167.
ZHANG Gaohang,LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):159-167.
[22] REZAEIMOZAFAR M,ESKANDARI M,SAVKIN A V. A self-optimizing scheduling model for large-scale EV fleets in microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(12):8177-8188.
[23] 艾欣,王坤宇,胡俊杰,等. 基于交互能源机制的产消者群分布式调度方法研究[J]. 电网技术,2020,44(5):1766-1777.
AI Xin,WANG Kunyu,HU Junjie,et al. Study on the distributed scheduling approach of aggregated prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Power System Technology,2020,44(5):1766-1777.
[24] JIN Xiaolong,WANG Xudong,MU Yunfei,et al. Optimal scheduling approach for a combined cooling,heating and power building microgrid considering virtual storage system[C]// Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston,MA,USA:IEEE,2016:1-5.
[25] MAO Meiqin,SUN Shujuan,CHANG Liuchen. Economic analy-

sis of the microgrid with multi-energy and electric vehicles [C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 2067-2072.

[26] BEER S, GOMEZ T, DALLINGER D, et al. An economic analysis of used electric vehicle batteries integrated into commercial building microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 517-525.

作者简介：

胡寰宇(1995—)，男，博士研究生，主要研究方向为新能源电力系统及微电网(**E-mail**：huanyuncepu@163.com)；

胡寰宇

艾　欣(1964—)，男，教授，博士研究生导师，主要研究方向为新能源电力系统及微电网(**E-mail**：aixin@ncepu.edu.cn)；

胡俊杰(1986—)，男，副教授，博士研究生导师，通信作者，主要研究方向为新能源电力系统及微电网(**E-mail**：junjiehu@ncepu.edu.cn)。

(**编辑**　任思思)

Energy management method of smart building cluster considering mobile energy storage characteristics of electric vehicles

HU Huanyu, AI Xin, HU Junjie, WANG Kunyu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract: Considering the mobility of electric vehicles among different buildings and their power interaction ability with multiple buildings, a two-stage intelligent building cluster energy management method based on the mobile energy storage sharing characteristics of electric vehicles is proposed. Taking the interconnected smart building cluster as the research scenario and considering the uncertainty of distributed renewable energy and building load, the upper-layer optimization model with the lowest operating cost of the building cluster including the mobile energy storage characteristics of electric vehicles is established by the stochastic programming method. Based on the energy distribution of electric vehicles in different buildings determined by the upper-layer optimization, the autonomous model with the lowest total operating cost of the building including flexible resource scheduling cost and transmission loss is established by the distributed algorithm in the lower-layer, from the perspective of the balance between supply and demand of the building cluster. The results of case study show that the proposed model and strategy can promote energy complementarity, improve the operation economy of building cluster and the utilization efficiency of renewable energy. It provides a way to solve the grid-connected consumption and balance of high proportion of distributed renewable energy.

Key words: electric vehicles; energy management; energy sharing; mobile energy storage; demand side flexibility; smart building

附录 A

表 A1 二元控制变量释意

Table A1 Binary variables explanation

变量	释义
δ^1	若 EV 产生充电行为，则 $\delta^1=1$，否则 $\delta^1=0$
δ^2	若 EV 产生放电行为，则 $\delta^2=1$，否则 $\delta^2=0$
δ^3	若 HVAC 处于制冷状态，则 $\delta^1=1$，否则 $\delta^1=0$
δ^4	若柔性负荷可控，则 $\delta^4=1$，则 $\delta^4=0$
δ^5	若 ESS 产生充电行为，则 $\delta^5=1$，否则 $\delta^5=0$
δ^6	若 ESS 产生放电行为，则 $\delta^6=1$，否则 $\delta^6=0$
δ^7	若楼宇向其他楼宇购买共享电能，则 $\delta^7=1$，否则 $\delta^7=0$
δ^8	若楼宇向其他楼宇出售共享电能，则 $\delta^8=1$，否则 $\delta^8=0$
δ^{on}	若柔性负荷产生开机操作，则 $\delta^{\mathrm{on}}=1$，否则 $\delta^{on}=0$
δ^{off}	若柔性负荷产生关机操作，则 $\delta^{\mathrm{off}}=1$，否则 $\delta^{off}=0$

表 A2 智能楼宇资源配置情况

Table A2 Profiles of smart building

楼宇	HVAC(7.2kW)参数		储能系统参数			柔性负荷参数			是否安装光伏	是否安装风电
	数量	θ^o/℃	容量/(kW·h)	$P_{\max/\min}^{\mathrm{ESS,ch/ESS,dis}}$/kW	$\eta^{\mathrm{ESS,ch/ESS,dis}}$	数量	$T^{\mathrm{on,min}}$/h	Γ/h		
1	—	—	2000	400	0.95	—	—	—	是	否
2	120	[23,28]	—	—	—	—	—	—	否	否
3	—	—	—	—	—	250	2	[19:00,22:00]	是	否
4	—	—	—	—	—	—	—	—	否	是
5	200	[23,26]	1200	200	0.95	—	—	—	否	否

其中,基荷误差服从正态分布 $\mathrm{N}(0,(0.2P_t^{\mathrm{BL}})^2)$，光伏误差服从正态分布 $\mathrm{N}\left(0,\left(0.2P_t^{\mathrm{PV}}\right)^2\right)$，风电误差服从正态分布 $\mathrm{N}\left(0,\left(0.2P_t^{\mathrm{WT}}\right)^2\right)$。

表 A3 EV 通勤于楼宇间的行驶距离分布情况

Table A3 Distance between buildings of EV

楼宇	距离/km	楼宇	距离/km
1 与 1	$\mathrm{N}(15,0.5^2)$	4 与 3	$\mathrm{N}(18,2.2^2)$
2 与 1	$\mathrm{N}(25,2^2)$	5 与 1	$\mathrm{N}(20,2^2)$
3 与 1	$\mathrm{N}(31,3^2)$	5 与 2	$\mathrm{N}(20,2.5^2)$
3 与 2	$\mathrm{N}(10,1^2)$	5 与 3	$\mathrm{N}(21,1.8^2)$
4 与 1	$\mathrm{N}(20,1.5^2)$	5 与 4	$\mathrm{N}(18,1.2^2)$
4 与 2	$\mathrm{N}(16,1.2^2)$		

附录 B

B1 移动场景预测的方法

为获得 EV 在智能楼宇群之间移动接入的场景，本文参照文献[10]采用基于出行链的 Monte Carlo 方法。将用户多次出行时刻概率分布、行驶距离等信息量作为 Monte Carlo 模拟的输入，EV 的移动场景模拟过程如下。其中，变量及下标含义同正文所述。

1)抽取任意 EV 的出行链长度 S_j^{trip}；

2)抽取 EV 的出行时刻 $t_{a,u}$；

3)抽取出行目的地，根据用户当前出行时刻的转移概率矩阵，抽取出行目的地；

4)抽取行驶路程 $D_{j,u}$；

5)若行程数达到出行链长度，则进入步骤 8)，否则进入步骤 6)；

6)抽取 EV 的离网时刻(下一次出行时刻) $t_{a,u+1}$；

7)计算 EV 停放时长 $t_{l,u}$， $t_{l,u}=t_{a,u+1}-t_{a,u}$；

8)任意 EV 基于出行链的出行场景预测结束。

本文设置区域内共计 240 台 EV，其出行链长度统一设置为 $S_j^{\mathrm{trip}}=3$。EV 的出行概率参照文献[25]进行设置，EV 的行驶路程概率分布设置如表 A3 所示。通过式(6)可以求取 EV 的路程耗电量，值得说明的是，在明确的出行目的地前提下，EV 的行驶路程在非极端天气场景下可近似为常数（路程选择固定）。本文利用概率抽样的行驶距离来反映任意出行阶段路程耗电量的不确定性波动。

B2 移动场景预测结果

表 B1 EV 的移动场景

Table B1 Mobile scene of EV

楼宇编号	1	2	3	4	5
初始地点	20	100	100	10	10
移动矩阵/台	1	2	3	4	5
1	20	-	-	-	-
2	50	-	-	20	30
3	40	-	-	30	30
4	4	-	-	-	6
5	6	-	-	4	-
合计	120	100	100	64	76

表 B1 展示了初始的 EV 数量及 EV 移动性，以智能楼宇 2 为例：智能楼宇 2 拥有 100 台通勤 EV，其在白天由智能楼宇 2 向智能楼宇 1 移动 50 台，向智能楼宇 4 移动 20 台，向智能楼宇 5 移动 30 台，夜间 100 台 EV 集中返回智能楼宇 2 停放直至次日出行。

附录 C

表 C1 可再生能源及基荷不确定性场景集概率分布情况

Table C1 Probability of scenarios under the uncertainty of distributed renewable energy and based load

场景	概率	场景	概率
1	0.0995	6	0.0890
2	0.1020	7	0.1200
3	0.0915	8	0.0820
4	0.1180	9	0.1025
5	0.0865	10	0.1090

楼宇 1 为大工业型负荷特征，楼宇 2 和楼宇 3 为民用负荷特征，楼宇 4 为农业负荷特征，楼宇 5 为一般工商业负荷特征，算例负荷。

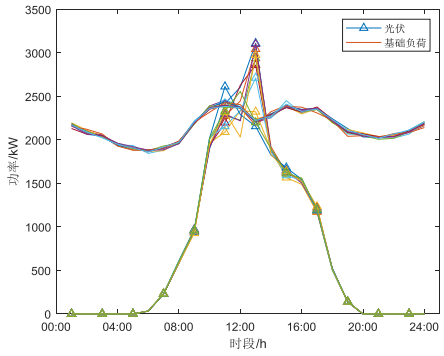


图 C1 智能楼宇 1 的不确定场景集

Fig.C1 Set of uncertain scenarios for smart building 1

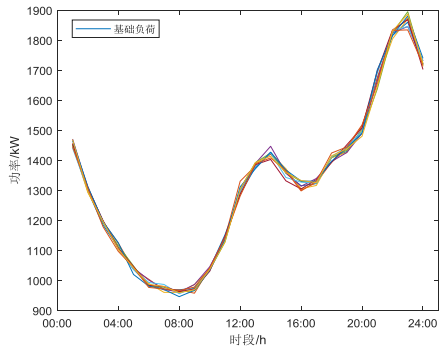


图 C2 智能楼宇 2 的不确定场景集

Fig.C2 Set of uncertain scenarios for smart building 2

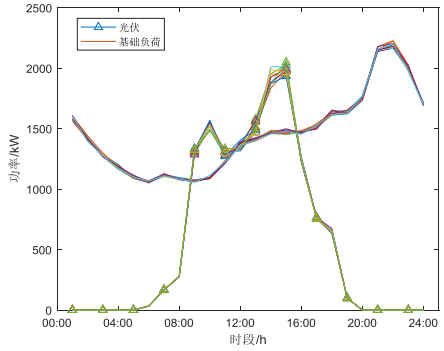


图 C3 智能楼宇 3 的不确定场景集

Fig.C3 Set of uncertain scenarios for smart building 3

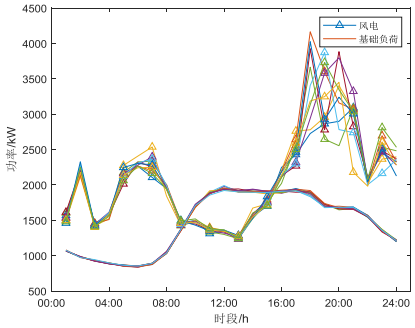


图 C4 智能楼宇 4 的不确定场景集

Fig.C4 Set of uncertain scenarios for smart building 4

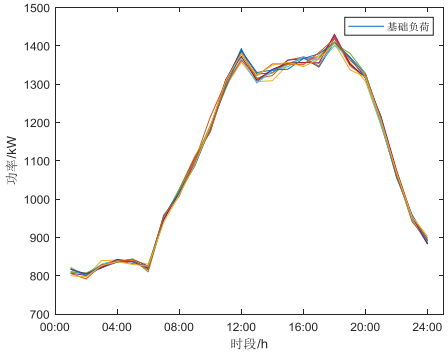


图 C5 智能楼宇 5 的不确定场景集

Fig.C5 Set of uncertain scenarios for smart building 5

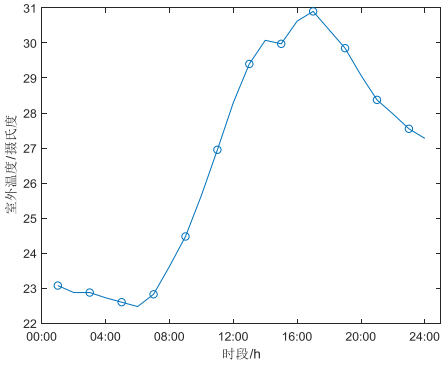
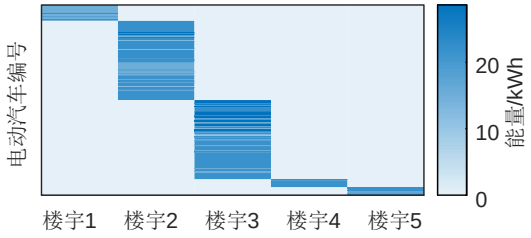


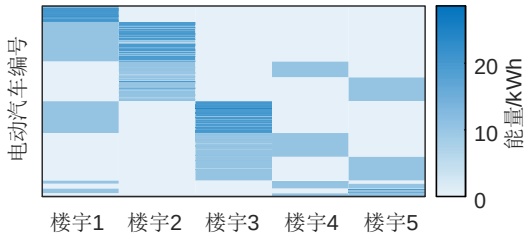
图 C6 智能楼宇室外温度

Fig.C6 Outdoor temperature of building

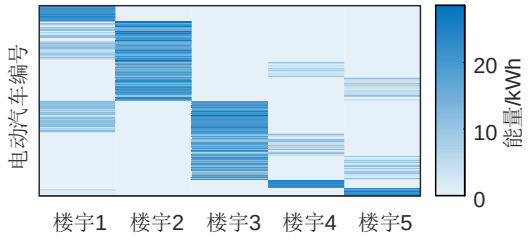
附录 D



(a) 不考虑移动性的即插即充场景



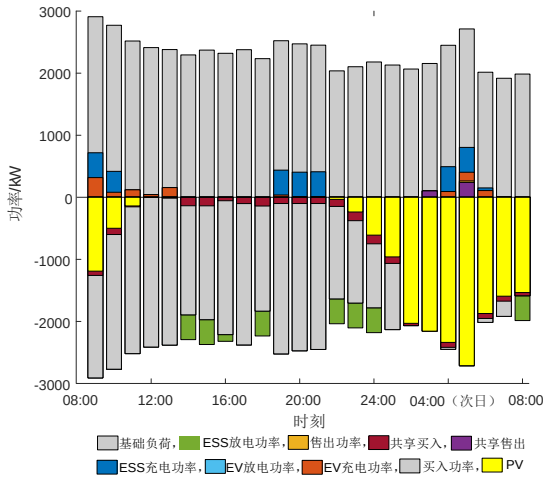
(b) 考虑移动性的即插即充场景



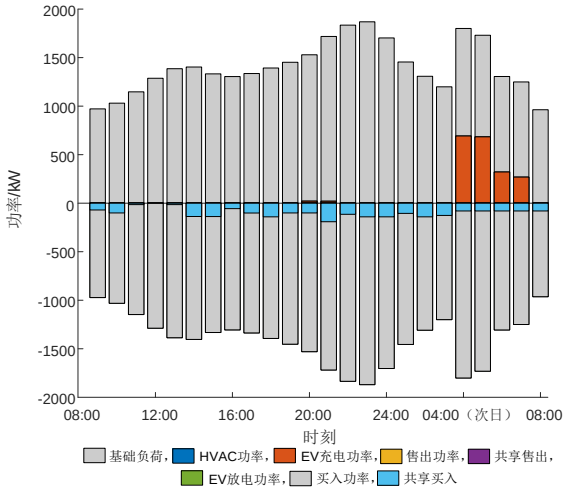
(c) 考虑移动储能共享的场景

图 D1 不同场景下 EV 充电能量分配热力图

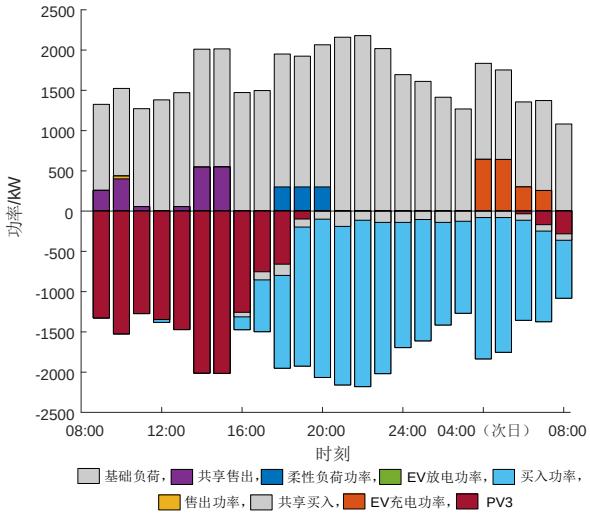
Fig.D1 EV charging energy distribution thermal diagram under different scenarios



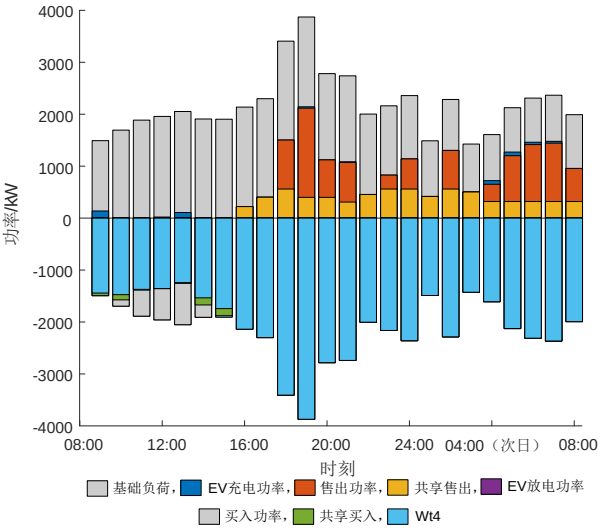
(a) 智能楼宇 1 功率分配



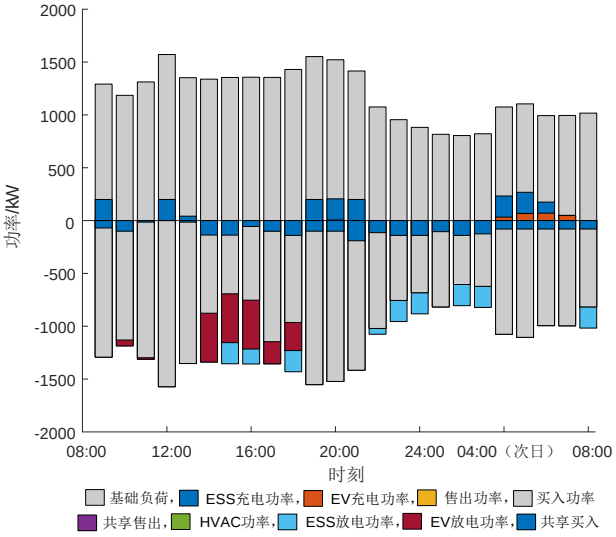
(b) 智能楼宇 2 功率分配



(c) 智能楼宇 3 功率分



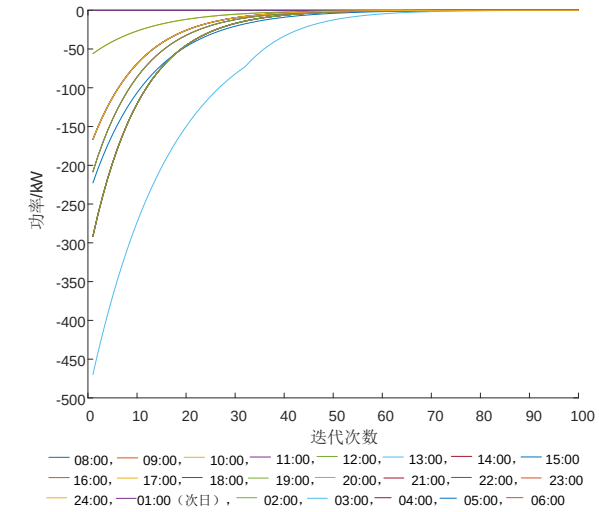
(d) 智能楼宇 4 功率分配



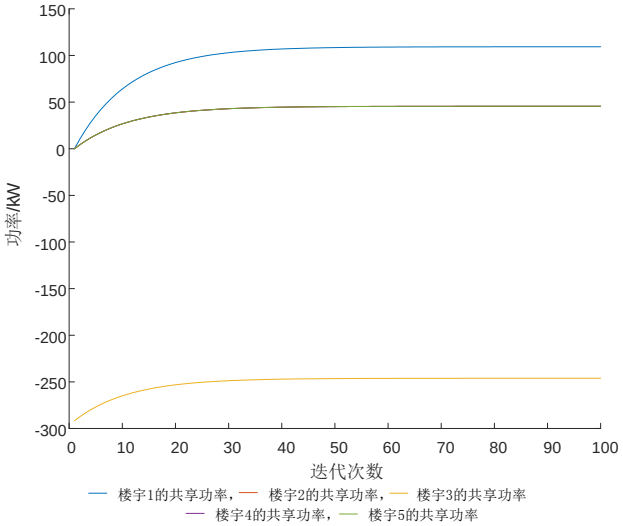
(e) 智能楼宇 5 功率分配

图 D2 智能楼宇各时段功率分配分析

Fig.D2 Analysis of power distribution of each building in 24 hours



(a) 全时段



(b) 15:00

图 D3 各时段的共享电量平衡收敛过程

Fig.D3 Iterative process of energy sharing balance in each time slot