文章编号:1674-2974(2026)03-0154-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026033

我国夏热冬冷地区住宅空调柔性调节策略及潜力

陈淑琴[1†],黄宇蕊[1],钱佳楠[1],李骥[2],路菲[2]
(1. 浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058;
2. 中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013)

摘 要:基于住宅空调的设备性能、设定温度、用能行为及住户柔性调节意愿的调查统计,结合夏热冬冷地区住宅空调的间歇性用能特点及运行概率分布特征,利用EnergyPlus建立了空调柔性潜力预测模型,分析了负荷削减、负荷中断及负荷转移等空调柔性调节策略的调节潜力,确定了夏热冬冷地区住宅空调的适宜柔性调节策略.研究结果表明,在不影响舒适性的前提下,制冷季执行负荷削减策略、供暖季执行负荷中断策略,可实现节能降本.若不考虑住户意愿,整栋住宅空调日最大制冷、供暖负荷峰值可分别降低24%和100%,制冷、供暖季电价高峰期运行能耗可分别降低30%和83%,制冷、供暖季受柔性调节影响能耗发生变化的时期合计运行成本分别减少14%和42%;若考虑住户意愿,日最大制冷、供暖负荷峰值可分别降低18%和77%,制冷、供暖季电价高峰期运行能耗可分别降低22%和64%,制冷、供暖季受柔性调节影响能耗发生变化的时期合计运行成本分别减少10%和33%.

关键词:柔性调节策略;可行性;调节潜力;住宅建筑;空调
中图分类号:TU243 **文献标志码**:A

Flexible scheduling strategy and potential analysis of residential air-conditioning in China's hot-summer and cold-winter zone

CHEN Shuqin[1†], HUANG Yurui[1], QIAN Jia'nan[1], LI Ji[2], LU Fei[2]
(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: An air conditioning (AC) flexibility potential prediction model was created using EnergyPlus based on the investigation and results of residential AC equipment performance, set temperatures, energy use behavior, and occupant willingness to participate in flexible scheduling. It also took into account the intermittent operation and performance probability of ACs in the hot-summer and cold-winter (HSCW) zones. The flexibility potentials of several AC control strategies, such as load reduction, load interruption, and load shifting, were evaluated, and suitable flexibility control strategies for residential AC systems in HSCW zone were identified. The results show that load reduction during the cooling season and load interruption during the heating season can result in energy conservation and cost reduction without sacrificing thermal comfort. Without taking into account occupant willingness, the daily maximum cooling and heating load peaks of the residential building can be reduced by to 24%

* **收稿日期**:2025-01-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278179),National Natural Science Foundation of China (52278179)
作者简介:陈淑琴(1981—),女,湖南邵阳人,浙江大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: hn_csq@126.com

and 100% respectively, the operation energy consumption during the peak electricity price periods in the cooling and heating seasons can be reduced by 30% and 83% respectively, and the total operating costs during the periods when the energy consumption changes due to flexible adjustment in the cooling and heating seasons can be reduced by 14% and 42% respectively. If the occupant willingness is taken into account, the daily maximum cooling and heating load peaks can be reduced by 18% and 77% respectively, the operation energy consumption during the peak electricity price periods in the cooling and heating seasons can be reduced by 22% and 64% respectively, and the total operating costs during the periods when the energy consumption changes due to flexible scheduling in the cooling and heating seasons can be reduced by 10% and 33% respectively.

Key words: flexible scheduling strategies; feasibility; potential analysis; residential buildings; air conditioning

可再生能源的大规模应用是实现建筑领域双碳目标的重要路径[1].但可再生能源系统产能有明显的波动性,如何消纳大规模间歇性能源,实现供需侧的实时平衡尤为重要[2].建筑柔性用能是指建筑及其使用者利用用能设备、储能(包括储电、储热、储冷)、建筑围护结构的热惰性或用能行为优化等手段,对建筑设备的运行功率与能耗总量进行主动调节的用能模式[3-4].这种柔性用能模式能够促进可再生能源的大规模消纳,同时降低电网峰值负荷压力[5-6].

我国城镇住宅运行能耗约占建筑运行总能耗的26%,碳排放占24%,是建筑节能减排的重要组成部分[7].住宅的柔性用能设备多,调节灵活性强,经济激励效果明显[8].空调是重要的柔性用能设备[9],其运行能耗约占建筑设备运行总能耗的40%[10].通过改变空调设定温度、运行时间、围护结构蓄能等方式可实现柔性负荷调节,显著提升用能柔性[11].当前,仅少数学者对住宅空调柔性调节潜力进行研究.Hu等[12]对空调使用模式进行了聚类,利用蒙特卡罗法进行空调运行不确定性的动态模拟,进而基于灰箱模型量化调节策略执行前后的柔性调节潜力.Elhefny等[13]采用EnergyPlus能耗模拟软件预测了美国100套住宅的空调日能耗需求,并估算了负荷削减策略执行前后的能耗量差异,分析了住宅空调柔性调节潜力.但上述研究仅考虑了负荷削减[14]这一柔性调节策略,没有考虑负荷中断[15]、负荷转移[16]等其他策略或策略组合对空调能源柔性调节潜力的影响.

夏热冬冷地区包括16个省份及直辖市,气候条件、建筑热工特性、用能习惯等具有显著的自身特点[17-18],因此不同调节策略下的空调制冷和供暖柔性调节潜力与其他地区存在显著差异.本研究以我国夏热冬冷地区住宅空调为研究对象,考虑了空调使用行为和住户参与意愿的不确定性,构建了住宅空调柔性调节潜力预测模型,分析了空调执行负荷削减、负荷中断及负荷转移等策略的柔性调节潜力,进而确定了适宜于夏热冬冷地区住宅空调的柔性调节策略.精准预测各类空调柔性调节策略的调节潜力,不仅可以降低高峰期用电需求,确保用户的舒适度,还能优化电力资源配置,确保电力供应的稳定性和可靠性.本研究的研究成果为智能电网需求侧负荷管理提供了理论依据.

1　研究方法

1.1　住宅空调柔性用能相关信息收集

为获得典型住区形式,本研究通过房产交易市场对夏热冬冷地区1 562个住区进行了特征调研[19].其中,住宅建筑形体以板楼为主,约占67%.建造年代在2010年以后的比例最高,达到62%.单元类型为1梯2户的比例最高,达到50%.户型为3室2厅的比例最高,占40%.建筑楼层为7~18层的小高层住宅建筑比例最高,达到46%.基于上述特征,本研究选取了比例最大的一类典型住宅建筑进行实测,该典型建筑建成于2010年,朝南建造.单元类型为1梯2户,共11层,户均面积约120 m^2,为3室2厅布局,平面布局见图1.该栋建筑内共44户,空调类型均为分体空调.每户分别实测一个客厅空调和两个卧室空调,共计132台空调.夏季的实测时间为2022年7月—8月,冬季的实测时间为2022年12月—2023年1月.实测内容包括每日空调运行时间、空调运行温度及其能耗.测量设备为无线功率记录仪WGLZY-1和温度自记仪WZY-1,记录频率均为5 min.

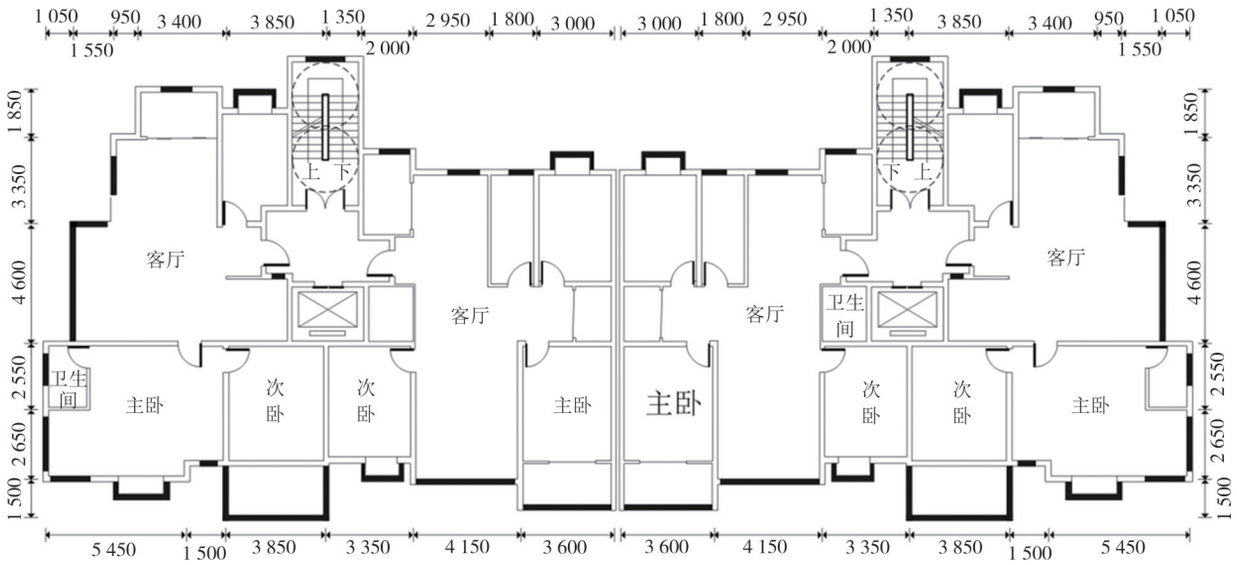


图 1 住宅建筑平面布局(单位:mm)

Fig.1 Residential building floor plan layout(unit: mm)

针对每位实测住户,同步发放调研问卷.问卷内容涵盖空调设备性能以及住户柔性调节意愿.问卷设计的柔性调节意愿分为“100% 愿意”“75% 愿意”“50% 愿意”“25% 愿意”以及“不愿意”5 个等级.其中,“100% 愿意”表示住户每天都愿意参与柔性调节,“75% 愿意”表示住户一周有 5 天愿意参与柔性调节,依此类推.同时,对于愿意参与柔性调节的住户,追问其对于空调设定温度调节程度的选择,如在电价高峰期夏季升高或冬季降低空调设定温度(1~4 ℃).动态电价设定参照文献[20],设定 11:00—12:00、18:00—20:00 为电价高峰期,各时段电价如图 2 所示.

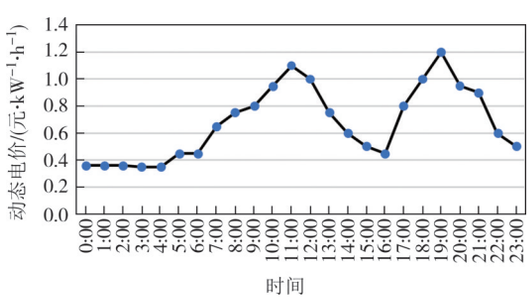


图 2 住宅动态电价

Fig.2 Residential dynamic electricity price

数据处理方面,先将空调使用时间、室内外温度、能耗等实测数据处理成连续的时间序列.再去除偏离数据均值 3 倍标准差的异常值,并通过线性插值法填补缺失值,确保数据完整性和连续性.

1.2 住宅空调制冷、供暖基准能耗预测模型

首先,通过 IBM SPSS Statistics 软件,利用 *K*-Means 聚类方法[21]对住户每日空调使用时间进行聚类,形成卧室与客厅的制冷、供暖典型时间表,如表 1 所示.然后基于各类典型时间表的概率函数,利用蒙特卡罗法[22]随机生成所有住户在制冷季和供暖季的客厅及卧室空调每日运行时间表,以描述空调的逐日使用行为.最后,在 EnergyPlus 能耗模拟软件中构建住宅空调制冷、供暖基准能耗预测模型,进行步长为 5 min 的空调基准能耗模拟.结合课题组前序研究[23],划定出该地区空调供暖期为 11 月 15 日—次年 3 月 20 日,制冷期为 6 月 27 日—9 月 2 日.定义该模型计算的运行负荷、能耗及运行成本为空调基准负荷、基准能耗及基准运行成本.

模型输入参数中,建筑形体参考实测建筑的建筑平面及高度.建筑围护结构热工性能参考《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134—2010)[24],参数设定如表 2 所示.

空调设备能效等级设定参照每位住户的调研结果,详见表 3.其中,1 级和 2 级能效的节能空调在卧室和客厅的比例分别约为 46% 和 52%.每个等级对应的能效比(即名义制冷量或制热量与运行功率之比)参考《房间空气调节器能效限定值及能效等级》(GB 21455—2019)[25].

空调使用时间输入为蒙特卡罗法随机生成的客厅及卧室空调每日运行时间表.而空调设定温度源自每个住户实际测量数据,如图 3 所示.卧室和客厅的制冷空调设定温度为 26 ℃的比例均最高.但卧室中比例最大的供暖设定温度为 20 ℃,而客厅中供暖设定温度为 16 ℃的比例最高.

表 1　用能行为聚类结果

Tab.1　Energy consumption behavior clustering results

房间	典型模式	模式占比/%	24 h内不同时刻空调开启概率/%																							
			0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
卧室制冷	A_{BC}	23	83	82	80	78	78	75	73	67	66	65	71	77	87	89	90	92	92	85	76	81	87	89	89	88
	B_{BC}	38	96	97	98	95	91	85	68	46	27	16	10	7	8	10	11	10	8	7	14	24	49	69	83	86
	C_{BC}	39	12	9	6	6	6	3	3	4	4	5	6	6	11	14	14	14	13	10	12	20	33	36	35	28
卧室供暖	A_{BH}	12	62	60	62	60	58	64	65	67	73	71	87	87	96	93	93	95	93	91	87	91	91	87	82	75
	B_{BH}	34	98	100	99	100	100	99	98	87	48	23	19	11	7	5	2	2	5	10	22	39	64	80	88	90
	C_{BH}	29	15	7	4	1	0	0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	1	2	8	32	54	83	100	89	66
	D_{BH}	25	4	8	8	4	4	4	2	5	13	8	10	9	8	9	7	8	8	5	8	12	8	4	14	12
客厅制冷	A_{LC}	7	98	100	100	100	95	88	76	75	69	63	69	78	78	75	78	78	78	78	85	88	93	97	95	95
	B_{LC}	38	3	1	0	0	0	0	5	21	44	58	73	88	90	83	85	85	88	82	73	61	54	36	20	7
	C_{LC}	55	2	2	2	3	2	2	4	6	10	13	18	18	17	14	11	12	19	20	22	19	17	11	7	4
客厅供暖	A_{LH}	4	71	79	79	93	93	100	100	100	100	86	86	86	93	79	79	79	79	86	93	86	93	93	71	57
	B_{LH}	21	1	0	1	1	0	0	1	13	35	48	61	67	87	96	95	99	93	95	96	75	51	32	20	3
	C_{LH}	23	0	0	0	0	0	0	6	51	75	80	91	95	91	85	74	64	44	6	0	0	0	0	0	0
	D_{LH}	21	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	3	15	41	81	90	90	66	34	11

表 2　住宅建筑模型围护结构设置

Tab.2　Residential building envelope settings

种类	结构设定	传热系数/($W·m^{-2}·K^{-1}$)
外墙	5 mm水泥砂浆+240 mm混凝土多孔砖+15 mm保温砂浆	1.5
屋顶	6 mm卷材防水层+50 mm聚苯乙烯保温板+10 mm水泥砂浆找平层+40 mm水泥砂浆找坡层+120 mm钢筋混凝土屋面板+20 mm水泥砂浆	0.7
窗户	铝合金双层中空玻璃窗	3.1
隔墙	20 mm水泥砂浆+120 mm砖墙+20 mm水泥砂浆	2.2
楼板	100 mm钢筋混凝土屋面板	2.9

表 3　空调能效等级分布

Tab.3　Air-conditioner energy efficiency level distribution

能效等级	卧室空调	客厅空调	能效比
1级能效	41%	36%	3.4
2级能效	5%	16%	3.2
其他等级	54%	48%	2.8

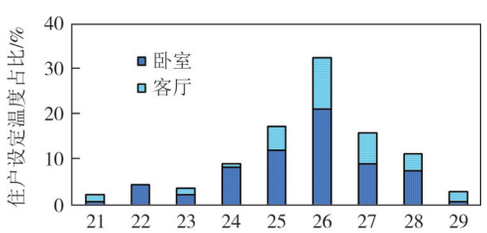
另外,设定换气次数为1.0 次/h,室内照明得热为0.014 kW·h/(m^2·d),其他室内得热平均强度为4.3 W/m^2[24]. 室外温度参数来源为现场实测,其他气象参数参照住宅建筑所在城市气象数据.

1.3　基准能耗预测模型校核

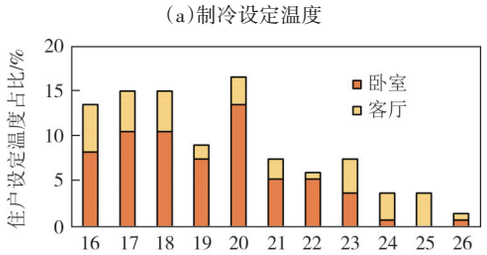
采用均方根误差变异系数(coefficient of variation of root mean square error, CV-RMSE)$C_{V\text{-}RMSE}$[26]对比空调单位面积实测能耗与模拟能耗的结果进行模型校核,计算方法如式(1)所示. 卧室空调合计、客厅空调合计以及整栋所有空调合计的$C_{V\text{-}RMSE}$均为6%,符合ASHRAE模拟精度检验$C_{V\text{-}RMSE}$低于15%的要求[26].

$$C_{V\text{-}RMSE}=\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(p_i-a_i\right)^2}}{\bar{a}}\times 100\% \tag{1}$$

式中:a_i为实测数值;p_i为模拟预测数值;$\bar{a}$为实测数值的平均值.



(a)制冷设定温度



(b)供暖设定温度

图 3　空调设定温度

Fig.3　Air-conditioner set temperatures

1.4 住宅空调执行柔性调节后的能耗预测模型

空调适用的柔性调节策略主要分为负荷削减、负荷中断及负荷转移3类[14,27]，具体策略描述如表4所示.其中，RY表示根据问卷调研结果选择调节1、2、3或4 ℃.同时，上述3类柔性调节策略两两排列组合，形成组合策略S4-S7. 因策略种类多，以“R*D*-S*E*-A*F*”格式编写了各类柔性调节策略的代号.其中，R*D*中的*D*表示负荷削减的调节程度，即1~4 ℃；S*E*中的*E*表示负荷中断的调节程度，即30~120 min；A*F*中的*F*表示负荷转移的调节程度，即提前30~60 min.

表4 住宅空调柔性调节策略

Tab.4 Residential air-conditioner flexible control strategies

柔性策略	策略描述	编号
S1负荷削减	高峰期设定温度调节1 ℃	R1
	高峰期设定温度调节2 ℃	R2
	高峰期设定温度调节3 ℃	R3
	高峰期设定温度调节4 ℃	R4
	高峰期设定温度调节1~4 ℃	RY
S2负荷中断	高峰期间暂停空调运行30 min	S30
	高峰期间暂停空调运行60 min	S60
	高峰期间暂停空调运行90 min	S90
	高峰期间暂停空调运行120 min	S120
S3负荷转移	高峰期前30 min开机且设定温度不变	A30
	高峰期前60 min开机且设定温度不变	A60
	高峰期前30 min开机且设定温度调节1 ℃	A30R1
	高峰期前30 min开机且设定温度调节2 ℃	A30R2
	高峰期前60 min开机且设定温度调节1 ℃	A60R1
	高峰期前60 min开机且设定温度调节2 ℃	A60R2
组合策略	S4负荷削减策略与负荷中断策略组合	R*D*-S*E*
	S5负荷削减策略与负荷转移策略组合	R*D*-A*F*
	S6负荷中断策略与负荷转移策略组合	S*E*-A*F*
	S7负荷削减、负荷中断及负荷转移策略组合	R*D*-S*E*-A*F*

住户柔性调节意愿的调研统计结果如图4所示.有33%的住户表现出完全愿意参与空调柔性调节，34%的住户表达了“75%愿意”的参与意愿.此外，42%的住户选择了设定温度调节上限为2 ℃，25%的住户偏好4 ℃的调节上限.

基于上述调研结果，利用蒙特卡罗法随机生成所有住户每日客厅及卧室空调执行柔性调节策略的意愿.再根据每日意愿调整每位住户每日空调使用时间及设定温度，并将其作为住宅空调执行柔性调节后的能耗预测模型的输入参数，进行柔性调节后的能耗预测.

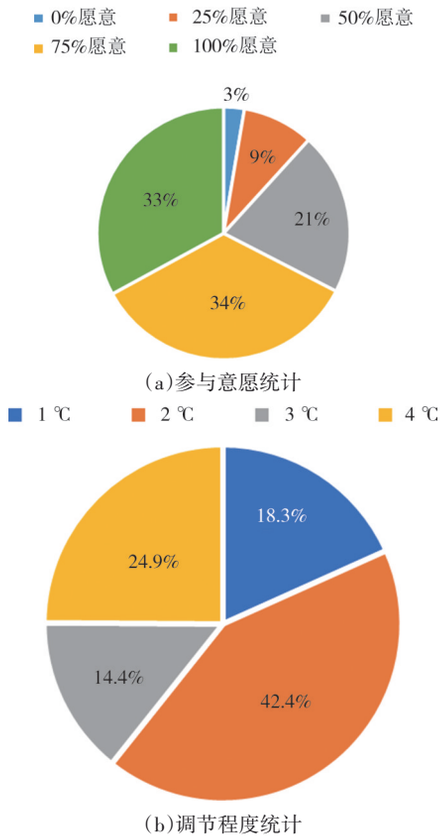


图4 住户参与柔性调节及调节程度的意愿统计结果

Fig.4 Occupant willingness for flexible adjustment and adjustment degrees

为确保柔性调节策略在实际应用中的可行性和合理性，需对上述策略应用的可行性进行判断，条件如下：①该柔性调节策略必须适用于区域内80%以上的住户；②在柔性调节期间，必须保证室内热舒适温度处于住户适应性热舒适范围内.大量文献[23,28-30]调研发现夏热冬冷地区80%以上住户满意的适应性热舒适范围为夏季低于29 ℃且冬季高于14 ℃；③区域内80%以上住户因柔性调节额外增加的能耗不超过调节前对应时段空调能耗的10%.

1.5 住区空调柔性调节潜力预测

选取负荷柔性、能量柔性及柔性收益3个评价指标，评估住宅空调在负荷和能耗方面的柔性调节潜力.然后将1.2节预测得到的住区空调制冷、供暖基准负荷、能耗、运行成本与1.4节预测得到的住区空调执行柔性调节后的制冷、供暖负荷、能耗、运行成本作为选定空调柔性调节潜力评价指标的输入变量，计算住区空调执行柔性调节策略后的负荷柔性、能量柔性以及柔性收益，预测住区空调柔性调节潜力.

1)负荷柔性ΔP_t表示当日电价高峰时段t空调的负荷变化量[31],计算方法如式(2)所示.

$$\Delta P_{t_s} = P_{t_s,\text{before}} - P_{t_s,\text{after}} \tag{2}$$

式中:$P_{t_s,\text{before}}$为柔性调节前电价高峰时刻t_s空调运行负荷,W;$P_{t_s,\text{after}}$为柔性调节后电价高峰时刻t_s空调运行负荷,W.

2)能量柔性ΔE_t表示电价高峰时段t空调的用电量变化范围[32],计算方法如式(3)所示.

$$\Delta E_t = E_{t,\text{before}} - E_{t,\text{after}} \tag{3}$$

式中:$E_{t,\text{before}}$为柔性调节前电价高峰时段t空调运行用电量,kW·h;$E_{t,\text{after}}$为柔性调节后电价高峰时段t空调运行用电量,kW·h.

3)柔性收益ΔY_{ts}表示柔性调节影响期的成本变化量.定义受柔性调节影响负荷或能耗发生变化的时段为柔性调节影响期.例如,空调受预冷预热措施影响高峰期前的部分时段负荷或能耗增加,受回弹效应影响高峰期后的部分时段负荷或能耗增加,上述时段均为柔性调节影响期[33-34].柔性调节影响期开始时间为柔性调节策略开始执行的时刻,结束时间为空调温度回弹效应结束的时刻,即室内温度恢复到与调节前空调设定温度的时刻.柔性收益计算方法如式(4)所示.

$$\Delta Y_{t_h} = \sum_{t_h=1}^{N_f} Y_{t_h}\left(E_{t_h,\text{ before}} - E_{t_h,\text{ after}}\right) \tag{4}$$

式中:Y_{t_h}为当前时段t_h的动态电价,元;$E_{t_h,\text{ before}}$为柔性调节前时段t_h空调运行用电量,kW·h;$E_{t_h,\text{ after}}$为柔性调节后时段t_h空调运行用电量,kW·h;N_f为柔性调节影响期的时长,h.

2　柔性调节策略可行性分析

2.1　负荷削减策略

结合住户的空调设定温度和住户使用意愿判断负荷削减策略的可行性,结果如表5所示.其中,在制冷和供暖工况下均有80%以上的住区住户可执行“R1”、“R2”以及“RY”3种策略,策略判定为可行.而其他策略未能满足可行性约束条件,不具备实际应用的可能性.

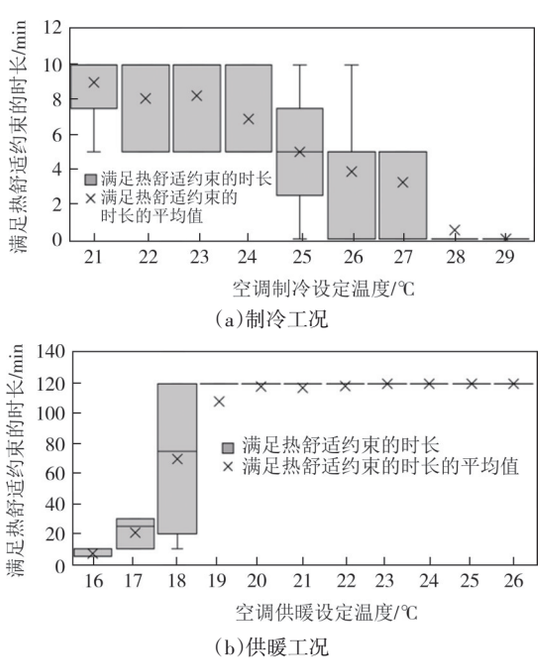
2.2　负荷中断策略

负荷中断策略执行后的满足热舒适约束时长如图5所示.制冷工况下,所有设定温度均无法使住户在制冷柔性调节期间满足室内热舒适要求,负荷中断策略不可行.而在供暖工况下,当空调设定温度为19 ℃及以上(约占建筑内空调总数的88%)时,供暖柔性调节期间均能满足室内热舒适要求,负荷中断策略可行.

表5　负荷削减策略可行性判断

Tab.5　Load reduction strategy feasibility analysis

空调工况	策略	可执行的住户比例%	可行性
制冷	高峰期设定温度升高1 ℃(R1)	94	√
	高峰期设定温度升高2 ℃(R2)	82	√
	高峰期设定温度升高3 ℃(R3)	39	×
	高峰期设定温度升高4 ℃(R4)	25	×
	高峰期设定温度升高1~4 ℃(RY)	100	√
供暖	高峰期设定温度降低1 ℃(R1)	98	√
	高峰期设定温度降低2 ℃(R2)	83	√
	高峰期设定温度降低3 ℃(R3)	39	×
	高峰期设定温度降低4 ℃(R4)	25	×
	高峰期设定温度降低1~4 ℃(RY)	100	√



(a)制冷工况

(b)供暖工况

图5　负荷中断策略可行性分析

Fig.5　Load interruption strategy feasibility analysis

2.3 负荷转移策略

首先,仅有3%的住户可以采用“A30”和“A60”的策略,因此这两种策略被判定为不可行.其次,如图6分析,当执行“A30R1”策略时,其因柔性调节产生的制冷或供暖能耗增加小于10%,该策略在制冷或供暖工况下均可行.然而,当执行“A30R2”、“A60R1”和“A60R2”策略时,因制冷能耗的增加仍然小于10%,但有22%、23%和42%的住户的供暖能耗增加超过10%,因此这3种策略适用于制冷工况,但不适合供暖工况.

2.4 组合策略分析

选取无法满足策略执行要求的单策略进行组合,判断组合后的策略可行性分析.

对于制冷的组合策略,基于室内热舒适约束评估.选取“S30-A30R1”与“S30-A30R2”策略组合进行模拟,结果如图7所示.所有住户在柔性调节期间仍然无法满足室内热舒适要求,因此这两个组合策略不可行.

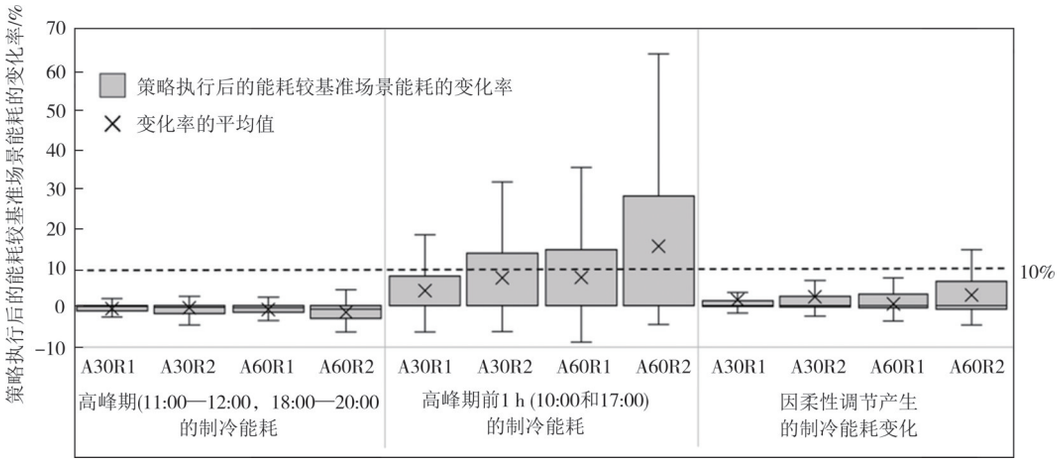


图6 负荷转移策略可行性分析

Fig.6 Load shifting strategy feasibility analysis

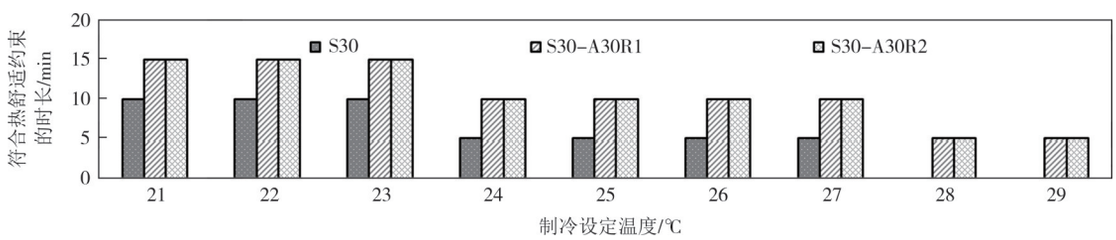


图7 制冷组合策略可行性判断

Fig.7 Cooling combination strategy feasibility judgment

对于供暖的组合策略,因各类单策略执行后的温度均满足热舒适要求,此处仅进行因柔性调节产生的供暖能耗变化是否符合要求的判断,结果如图8所示.“R1-A30R2”“R1-A60R1”“S30-A30R2”“S30-A60R1”“S120-A60R2”“R1-S30-A60R2”“R1-S60-A60R2”及“R1-S90-A60R2”策略执行后,满足要求的住户比例小于20%,策略可行.但“R1-A60R2”“R2-A60R2”“S30-A60R2”“S60-A60R2”以及“S90-A60R2”策略执行后,满足要求的住户均超过了20%,因此判定为不可行.

综上,案例住宅建筑可执行的空调制冷柔性调节策略共19种,供暖柔性调节策略共90种.策略数量差异与夏热冬冷地区围护结构热工设计要求以及住户冷、热适应能力强弱有关.《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)[35]规定该地区建筑热工设计必须满足夏季防热要求,适当兼顾冬季保温.同时,该地区居民对低温环境的热适应能力显著优于高温环境[23,29-30].这导致夏季执行负荷中断策略后室温易超出适应性热舒适阈值,而冬季则可满足适应性热舒适要求.因此,夏季仅能执行负荷削减与负荷转移两类策略,冬季则增加了负荷中断策略.经策略排列组合后,供暖季可行策略总数(包含单策略与组合策略)多于制冷季.

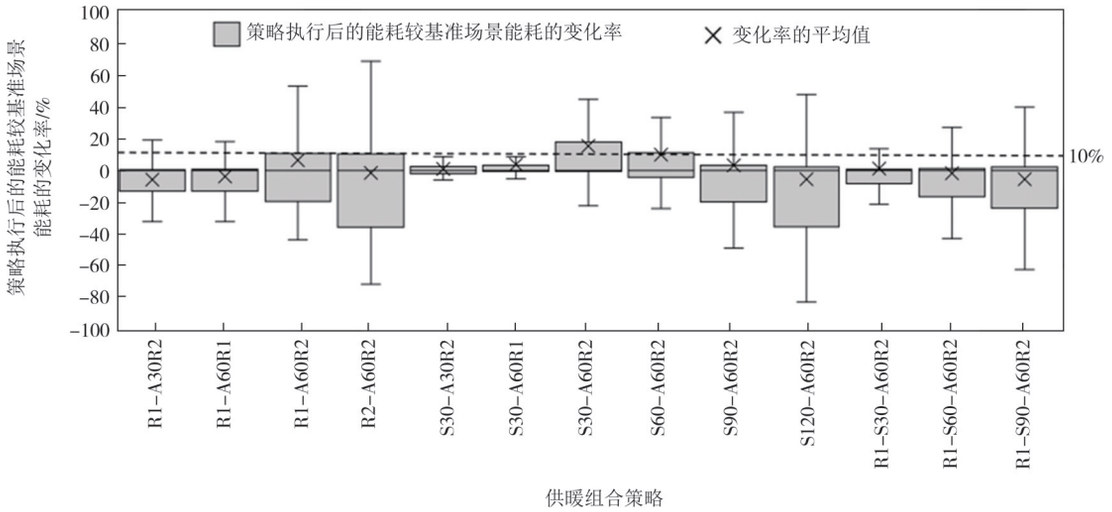


图 8　供暖组合策略可行性判断

Fig.8　Feasibility judgment of heating combination strategy

3　柔性分析结果

本研究分析了住宅建筑执行所有可行柔性调节策略(19种制冷、90种供暖柔性调节策略)后的柔性潜力. 制冷、供暖单策略执行后的柔性潜力如图9(a)(c)(e)所示. 因复合策略过多,选取单策略中柔性最大的策略组合成复合策略作为典型策略,执行后的柔性潜力展示在图9(b)(d)(f). 研究设定了“不考虑意愿”和“考虑意愿”两个场景:“不考虑意愿”场景指所有住户均执行柔性调节策略;“考虑意愿”场景指住户基于意愿执行柔性调节策略.

3.1　负荷柔性

如图9(a)所示,执行负荷削减策略产生的制冷负荷柔性较大,而执行负荷转移策略产生的柔性潜力较小. “不考虑意愿”场景下,不同策略执行后的所有空调合计日最大高峰期制冷负荷柔性的范围可达4~41 kW,负荷柔性分别占对应时期基准负荷的9%~24%,即日最大高峰期最多可降低制冷负荷24%. “考虑意愿”场景下,制冷负荷柔性略有减少,不同策略执行后制冷负荷柔性范围为3~30 kW,负荷柔性占对应时期基准负荷的比例范围为7%~18%. 两种场景下“S5−R2−A60R2”和“S5−RY−A60R2”策略均显示出最高的空调制冷负荷柔性.

空调供暖期间,高峰中断策略较其他负荷调节策略有较明显的供暖负荷柔性潜力增益. “不考虑意愿”场景下,不同策略执行后的所有空调合计日最大高峰期供暖负荷柔性范围为1.2~28 kW,负荷柔性分别占对应时期基准负荷的6%~100%. 其中,执行高峰中断策略时,因关停空调,日最大高峰期供暖负荷可降至0. 而“考虑意愿”场景下,不同策略执行后供暖负荷柔性范围为1.1~22 kW,负荷柔性是对应时期基准负荷的6%~77%. 两种场景下,所有与“S120”策略相关的策略供暖负荷柔性均最高.

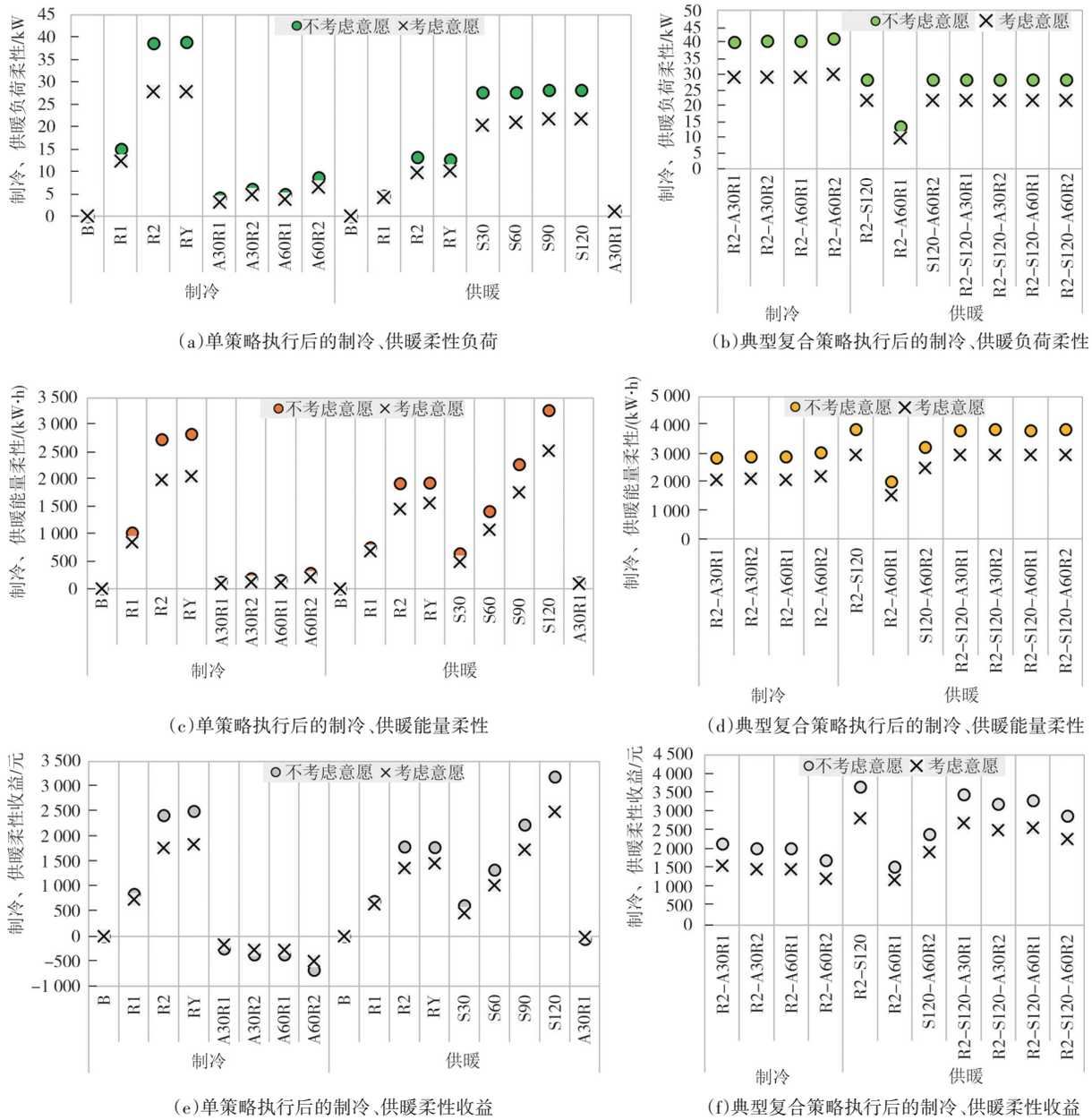
3.2　能量柔性

图9(c)可见执行负荷削减策略的制冷能量柔性潜力较大. “不考虑意愿”场景下,不同策略执行后的所有空调制冷季高峰期制冷能量柔性的范围为130~3 136 kW·h,能量柔性分别占对应时期基准能耗的1%~30%,即制冷季高峰期最多可降低制冷能耗30%. “考虑意愿”场景下,不同策略执行后制冷能量柔性的范围为92~2 286 kW·h,能量柔性分别占对应时期基准能耗的1%~22%. “S5−RY−A60R2”和“S5−R2−A60R2”策略在两种情景下的空调制冷能量柔性均最高.

空调供暖期间,负荷中断策略是主要的能量柔性来源. “不考虑意愿”场景下,不同策略执行后所有空调供暖季高峰期供暖能量柔性的范围为113~3 853 kW·h,能量柔性为对应时期基准能耗的2%~83%,即供暖季高峰期最多可降低供暖能耗83%. “考虑意愿”场景下,不同策略执行后所有空调在高峰期合计供暖能量柔性的范围为97~2 986 kW·h,能量柔性占对应时期基准能耗的2%~64%. 执行“S4−R2−S120”“S7−R2−S120−A60R2”策略在两种情景下的供暖能量柔性均最大.

3.3　柔性收益

制冷工况下,负荷削减策略显著提升了制冷柔性收益,而负荷转移策略导致制冷柔性收益较小且



(a)单策略执行后的制冷、供暖柔性负荷 (b)典型复合策略执行后的制冷、供暖负荷柔性

(c)单策略执行后的制冷、供暖能量柔性 (d)典型复合策略执行后的制冷、供暖能量柔性

(e)单策略执行后的制冷、供暖柔性收益 (f)典型复合策略执行后的制冷、供暖柔性收益

图9 空调制冷和供暖柔性调节潜力分析

Fig.9 Potential analysis of flexible adjustment of air conditioning for cooling and heating

可能为负数,如图9(e)所示.“不考虑意愿”场景下,不同策略执行后所有空调柔性调节影响期合计制冷柔性收益的范围为-762~2 035 元,最大值约为对应时段基准运行成本的14%.“考虑意愿”场景下,不同策略执行后所有空调柔性调节影响期合计制冷柔性收益的范围为-569~1 498 元,最大值约为对应时段基准运行成本的10%.两种场景下,均为执行“S1-RY”“S1-R2”策略产生的制冷柔性收益最大.

供暖工况下,柔性收益主要源于执行负荷中断策略.“不考虑意愿”场景下,不同策略执行后所有空调柔性调节影响期合计供暖柔性收益范围为-56~3 652 元,最大值约为对应时段基准运行成本的42%.“考虑意愿”场景下,不同策略执行后所有空调柔性调节影响期合计供暖柔性收益范围为-10~2 839 元,最大值约为对应时段基准运行成本的33%.两种场景下,供暖柔性收益最高的是执行“S4-R2-S120”和“S4-RY-S120”策略.

4 结 论

本研究以我国夏热冬冷地区住宅空调柔性为研究对象,分析了执行负荷削减、负荷中断及负荷转移

等柔性调节策略的可行性,预测了不同策略的能源柔性调节潜力,进而提出了适宜于夏热冬冷地区住宅空调的能源柔性调节策略.研究结论如下:

1)基于室内热舒适约束、住户可执行比例以及能耗增加比例约束,案例住宅制冷期可执行的柔性调节策略有19种,供暖期可执行的柔性调节策略有90种.

2)在不影响舒适性的前提下,制冷工况下执行负荷削减策略时,若不考虑住户意愿,整栋住宅空调日最大高峰期制冷负荷可降低24%,制冷季高峰期运行能耗可降低30%,制冷季柔性调节影响期运行成本可减少14%;考虑住户意愿时,日最大高峰期制冷负荷可降低18%,制冷季高峰期运行能耗可降低22%,制冷季柔性调节影响期运行成本可减少10%.供暖工况下执行负荷中断策略时,若不考虑住户意愿,因短期关停空调,整栋住宅空调日最大供暖负荷峰值会降为0,供暖季高峰期运行能耗可降低83%,供暖季柔性调节影响期运行成本可减少42%;考虑住户意愿时,日最大供暖负荷峰值可降低77%,供暖季高峰期运行能耗可降低64%,供暖季柔性调节影响期运行成本可减少33%.

3)综合考虑各类柔性调节策略执行后的负荷柔性、能量柔性及柔性收益,案例住宅空调制冷的最佳柔性调节策略包括“高峰期设定温度升高2 ℃”“高峰期设定温度升高1~4 ℃”“提前30 min运行温度降低1 ℃且高峰期设定温度升高2 ℃”以及“提前30 min运行温度降低1 ℃且高峰期设定温度升高1~4 ℃”.供暖的最佳柔性调节策略包括“高峰期间暂停空调运行120 min”“高峰期间暂停空调运行120 min且高峰期设定温度降低2 ℃或随住户意愿降低1~4 ℃”以及“提前30 min运行温度升高1 ℃、高峰期间暂停空调运行120 min且高峰期设定温度降低2 ℃”.

本文研究因实测条件限制仅选取夏热冬冷地区住宅建筑形体、朝向、楼型、户型等特征中占比最大的一类建筑进行实测调研,在后续研究中可扩大在夏热冬冷地区16个省份级直辖市的各类典型建筑中进行实测及调研,更精准评估夏热冬冷地区住宅空调柔性调节潜力.同时,建筑的蓄热性能会对本研究的研究结果有一定的影响,案例住宅建筑围护结构性能参照节能50%的建筑节能设计标准设定,该类型约占该地区围护结构类型的51%.后续将针对其他围护结构性能的建筑进行柔性调节策略可行性及柔性调节潜力的深入分析,以挖掘建筑围护结构性能对柔性调节潜力的影响机制.

参考文献

[1] 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL].(2021-10-26)[2025-01-23]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.

[2] 江亿. 光储直柔:助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J].暖通空调,2021,51(10):1-12.
JIANG Y. PSDF(photovoltaic,storage,DC,flexible): a new type of building power distribution system for zero carbon power system [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(10): 1-12.(in Chinese)

[3] JENSEN S Ø,MARSZAL-POMIANOWSKA A,LOLLINI R,et al. IEA EBC annex 67 energy flexible buildings [J]. Energy and Buildings,2017,155:25-34.

[4] 建筑光储直柔系统评价标准: T/CABEE 005—2023[S].北京:中国建筑工业出版社, 2023.
Assessment standard for Photovoltaics, Energy storage, Direct Current and Flexibility (PEDF) system in buildings: T/CABEE 005—2023 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023.(in Chinese)

[5] TANG H,WANG S W,LI H X. Flexibility categorization,sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings:state-of-the-art and future perspective[J]. Energy, 2021, 219: 119598.

[6] AMADEH A, LEE Z E, ZHANG K M. Quantifying demand flexibility of building energy systems under uncertainty [J]. Energy,2022,246:123291.

[7] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告2024(农村住宅专题)[M].北京:中国建筑工业出版社,2024.
Tsinghua University Building Energy Effciency Research Center. Annual development report on building energy efficiency in China 2024 (Rural Residential Buildings) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.(in Chinese)

[8] PALLONETTO F, ROSA M D, D'ETTORRE F, et al. On the assessment and control optimisation of demand response programs in residential buildings [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109861.

[9] DING Y, LIU Y F, WANG Q C, et al. Flexibility potential quantification and regulation measure comparison for the building air-conditioning system[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434:140086.

[10] GAO Y, SHI S R, MIYATA S, et al. Successful application of predictive information in deep reinforcement learning control: a case study based on an office building HVAC system[J]. Energy, 2024,291:130344.

[11] BAI Y F,ZHANG W R, YU T J, et al. Flexibility quantification and enhancement of flexible electric energy systems in buildings [J]. Journal of Building Engineering,2023,68:106114.

[12] HU M M,XIAO F. Quantifying uncertainty in the aggregate energy flexibility of high-rise residential building clusters considering stochastic occupancy and occupant behavior [J]. Energy, 2020,

194: 116838.

[13] ELHEFNY A, JIANG Z M, CAI J. Co-simulation and energy management of photovoltaic-rich residential communities for improved distribution voltage support with flexible loads[J]. Solar Energy,2022,231:516-526.

[14] YIN R X, KARA E C, LI Y P, et al. Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes[J]. Applied Energy,2016,177:149-164.

[15] MAIORINO A, DEL DUCA M G, MOTA-BABILONI A, et al. Achieving a running cost saving with a cabinet refrigerator incorporating a phase change material by the scheduling optimisation of its cyclic operations[J]. International Journal of Refrigeration,2020,117:237-246.

[16] D'HULST R, LABEEUW W, BEUSEN B, et al. Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: experiences from large pilot test in Belgium[J]. Applied Energy, 2015,155: 79-90.

[17] 浙江省发展和改革委员会,浙江省发展规划研究院. 未来社区: 浙江的理论与实践探索[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2021.
Zhejiang Provincial Development and Reform Commission, Zhejiang Development & Planning Institute. Future community: theoretical and practical exploration in Zhejiang[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2021.(in Chinese)

[18] DING Y, HAN S X, TIAN Z, et al. Review on occupancy detection and prediction in building simulation[J]. Building Simulation,2022,15(3):333-356.

[19] CHEN S Q, HUANG Y R, HU J M, et al. Prediction of urban residential energy consumption intensity in China toward 2060 under regional development scenarios[J]. Sustainable Cities and Society,2023,99:104924.

[20] 樊芮. 基于需求侧响应的智能家庭能效优化管理方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
FAN R. Research on smart home energy efficiency optimization management strategy based on demand response[D]. Changsha: Hunan University,2017.(in Chinese)

[21] CHEN S Q, HUANG Y R, HU J M, et al. Characterizing energy-related occupant behavior towards urban residential buildings in China with statistical database establishment[J]. Energy and Buildings,2024,324:114889.

[22] RUBINSTEIN R Y. Simulation and the Monte Carlo Method[M]. New York:Wiley,1981.

[23] 王新镇. 杭州住宅适应性热舒适特征及热环境调节策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
WANG X Z. Research on adaptive thermal comfort characteristics and thermal environment adjust strategy of Hangzhou dwelling house[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2019.(in Chinese)

[24] 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone: JGJ 134—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.(in Chinese)

[25] 房间空气调节器能效限定值及能效等级:GB 21455—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for room air conditioners: GB 21455—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.(in Chinese)

[26] MENG Q L, MOURSHED M. Degree-day based non-domestic building energy analytics and modelling should use building and type specific base temperatures[J]. Energy and Buildings, 2017, 155:260-268.

[27] LI H, WANG Z, HONG T Z, et al. Energy flexibility of residential buildings: a systematic review of characterization and quantification methods and applications[J]. Advances in Applied Energy,2021,3:100054.

[28] 李俊鸽,杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区夏季住宅室内适应性热舒适调查研究[J]. 四川建筑科学研究,2008, 34(4):200-205.
LI J G, YANG L, LIU J P. A thermal comfort field survey in residential buildings in hot-summer and cold-winter area[J]. Sichuan Building Science,2008,34(4):200-205.(in Chinese)

[29] 刘红, 郑文茜, 李百战, 等. 夏热冬冷地区非采暖空调建筑室内热环境行为适应性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011, 42(6): 1805-1812.
LIU H, ZHENG W Q, LI B Z, et al. Behavioural adaptation of indoor thermal environment in hot-summer and cold-winter zone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2011,42(6):1805-1812.(in Chinese)

[30] LIU H, WU Y X, LI B Z, et al. Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the Hot Summer and Cold Winter zone of China[J]. Energy and Buildings,2017,140:9-18.

[31] MORALES J M, CONEJO A J, MADSEN H, et al. Integrating renewables in electricity markets[M]. Boston, MA: Springer US, 2013: 137-171.

[32] REYNDERS G, DIRIKEN J, SAELENS D. Generic characterization method for energy flexibility: applied to structural thermal storage in residential buildings[J]. Applied Energy,2017, 198:192-202.

[33] 张天伟,王蓓蓓,贲树俊, 等. 兼顾降负荷和反弹抑制的负荷聚合商下空调集群调控策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 50-60.
ZHANG T W, WANG B B, BEN S J, et al. Control strategies for air-conditioning group under load aggregator considering load reduction and rebound suppression[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2019,31(3):50-60.(in Chinese)

[34] 许鹏,陈永保,李为林,等. 建筑需求响应控制及应用技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
XU P, CHEN Y B, LI W L, et al. Building demand response control and application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2020.(in Chinese)

[35] 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,2017.
Code for thermal design of civil building: GB 50176—2016[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2017.(in Chinese)