

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241160

## 基于前景理论的居民小区负荷日前随机优化调度策略

李恒杰<sup>1</sup>, 刘依环<sup>1</sup>, 曾贤强<sup>1</sup>, 谢兴峰<sup>1</sup>, 马喜平<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 随着居民用电量占比逐年上升, 需求侧柔性负荷在参与需求响应(demand response, DR)中凸显出巨大的可调度潜力。为解决居民小区柔性负荷在居民有限理性下参与 DR 的调度问题, 通过构建小区设备用能模型、用户随机行为模型、舒适度价值模型, 结合小区居民出行与天气预测数据, 以及电网颁布的分时电价、需求响应政策信息, 建立了基于前景理论(prospect theory, PT)的居民小区日前随机优化调度模型, 生成日前调度计划。该研究为现实居民小区的优化调度研究提供了可靠的用能数据参考, 同时更真实地模拟了居民在需求响应中的决策心理状态。最后, 模型在甘肃某实际居民小区进行验证, 结果表明, 决策主体的有限理性状态显著影响居民小区的优化调度, 基于 PT 的居民小区负荷日前随机优化模型可以在保障用户舒适度的情况下实现综合效益最大化。

**关键词:** 需求响应; 前景理论; 居民小区; 随机优化; 舒适度价值

### Day-ahead stochastic optimal scheduling strategy for residential community loads based on prospect theory

LI Hengjie<sup>1</sup>, LIU Yihuan<sup>1</sup>, ZENG Xianqiang<sup>1</sup>, XIE Xingfeng<sup>1</sup>, MA Xiping<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** With the continuous increase in residential electricity consumption, the potential for demand-side flexible loads to participate in demand response (DR) has become significant. To address the scheduling challenges of flexible loads in residential communities participating in DR under residents' bounded rationality, an energy usage model of household appliances, a stochastic user behavior model, and a comfort value model are constructed. Combined with relevant residents' travel and weather forecast data, time-of-use pricing, and DR policy information from the grid, a day-ahead stochastic optimal dispatch model is developed based on prospect theory (PT), generating day-ahead scheduling plans. This paper provides reliable data for optimizing dispatch in residential communities and realistically simulates residents' decision-making psychology in DR participation. Finally, the model is validated in a real residential community in Gansu. The results show that the bounded rationality of decision-makers significantly affects the optimal scheduling of residential communities, and that the PT-based day-ahead stochastic load optimization model can maximize overall benefits while ensuring user comfort.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167014).

**Key words:** demand response; prospect theory; residential community; stochastic optimization; comfort value

## 0 引言

需求响应通过合理调度需求侧资源推动双碳目标及新型电力系统的建设与发展。居民用电量逐年增大, 居民负荷占需求响应(demand response, DR)

潜力的 40%以上<sup>[1]</sup>, 同时, 新一代家用电器进行了智能化技术革新, 已具备负载管理和通信的功能<sup>[2]</sup>, 这使其作为居民可调度负荷参与需求响应潜力巨大。充分利用居民负荷参与电力需求响应, 对于优化可再生能源消纳、深化电力需求侧管理具有重大意义<sup>[3-4]</sup>。

目前已有许多学者对居民负荷参与需求响应进行了研究。文献[5-6]分别以空调(air conditioning, AC)、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167014)

电动汽车(electric vehicle, EV)作为调度对象, 但仅考虑了单个设备。文献[7-8]虽然考虑了多设备共同作用, 但仅考虑了单户住宅没有考虑多户住宅同时用能的影响。文献[9]以假设的智能小区为调度主体, 但没有考虑现实小区的实际负荷组成情况。考虑到我国电力系统建设以居民小区作为新型电力系统能源消耗终端的工程实际, 本文以实际居民小区作为测试主体, 同时对实际居民小区负荷进行建模。

对于居民负荷参与优化调度的目标设定, 以往相关研究多基于传统的预期效用理论(expected utility theory, EUT), 该理论假设决策者完全理性, 以长期的经济效益为唯一目标导向<sup>[10]</sup>。如文献[11-12]以峰值负荷或用电成本最小为目标, 虽然获得了较好的调度效果, 但忽略了人的主观性带来的现实偏差。文献[13]指出这种认为决策者完全理性的假设太过绝对, 往往导致与电力行业中用户的实际决策结果相悖。对此, 文献[14]提出前景理论(prospect theory, PT), 用以捕捉人类群体有限理性状态对决策造成的不确定性影响, 通过主观价值和客观价值之间的量化关系刻画了该影响造成的群体性偏差。

从对 PT 的研究应用范围来看, 采用 PT 解决电力领域工程问题的研究近年才逐渐兴起。如文献[15]提出低碳背景下多新能源场站联合投资氢储能的演化行为分析方法。文献[16]基于传统博弈论和 PT 提出一种基于虚拟博弈的新算法, 用以评估客户行为对需求侧管理的影响。这些研究多集中于电力市场领域, 关于将 PT 应用于优化调度的研究较少。本文基于 PT 构建决策价值模型指导居民负荷参与优化调度, 实际决策价值由经济性指标和用户舒适度指标共同构成。

经济性指标可通过计量装置测得, 舒适度变化则难以量化, 其取决于居民的个人偏好、用能行为等, 具有较大的随机性。关于构建居民用能舒适度模型的研究, 文献[7,17]通过限制舒适度带宽来间接对舒适度进行约束, 没有考虑不同用户舒适度的个性偏好。文献[18]测量了不同用户的湿设备使用需求, 但以问卷形式进行, 难以泛化。文献[8,19]根据调度带来的时间或温度的偏移量对舒适度损失建立了更具普适性的混合整数线性模型, 但忽略了偏移产生时舒适度变化的边际效应<sup>[20]</sup>, 也没有给出舒适度模型加入目标函数时权重设定的理论依据。

综上所述, 现有研究大多对舒适度的量化方法缺乏合理性, 且在计算用户经济性指标损失时往往忽略决策者的有限理性状态, 使预估决策结果存在和现实情况相悖的可能性。对此, 本文根据设备运行特性和用户消费情况, 同时考虑到居民负荷参与

需求响应决策时的个体偏差, 将舒适度视作商品, 建立“舒适度价值”的概念, 将舒适度变化映射为经济性指标以科学量化舒适度指标。基于前景理论构建包含舒适度价值、用户用电成本变化价值、需求响应补偿收益价值等的主观决策价值模型, 刻画居民负荷参与需求响应决策时的群体偏差。算例结果表明, 本文所提出的基于 PT 的日前随机优化调度模型能够在保证居民用电舒适度的同时, 降低居民用电成本, 有效实现需求响应目标。

## 1 智能居民小区运行框架及刚性负荷模型

### 1.1 智能居民小区运行框架

智能住宅小区参与需求响应模型如图 1 所示, 该小区由配电网供电, 并配备有光伏发电系统。按负荷响应特性可分为刚性负荷和柔性负荷, 刚性负荷为不可调度负荷, 包括公共刚性负荷和居民住宅刚性负荷, 可调度的柔性负荷包括温控负荷、可平移负荷、限时连续可调节负荷。

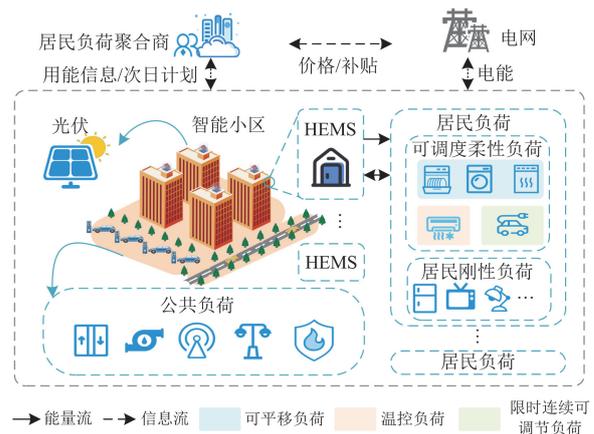


图 1 居民小区负荷参与电网需求响应控制框架

Fig. 1 Control framework for residential load participation in grid demand response

日前, 居民负荷聚合商根据电网公司发布的电价及需求响应信息, 结合居民预先设定或根据历史数据预测的次日用能需求信息及次日外界环境预测信息, 确定各个设备的次日运行计划。次日通过居民的家庭能量管理系统(home energy management system, HEMS)控制设备参与电网需求响应, 旨在使居民生活品质尽可能不受影响的情况下, 降低用能成本。同时, 参与电网的需求响应项目, 获得补贴收益, 实现智能用电。

### 1.2 智能居民小区公共负荷

本文小区公共负荷均为刚性负荷, 包括: 通信、公共照明、水泵(排污泵、生活水泵)、电梯、消防

设施负荷。消防设施负荷非灾时间运行负荷较小, 可以忽略不计。小区总负荷、各公共负荷及光伏出力数据如图 2 所示。

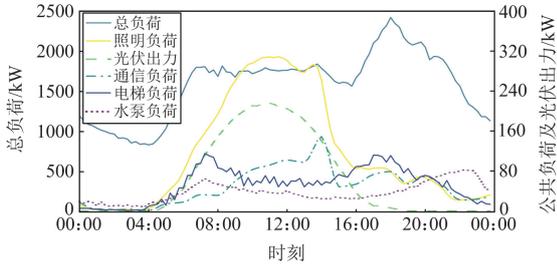


图 2 典型日小区总负荷、公共负荷、光伏出力

Fig. 2 Total load, public load, and PV output of a typical day for a community

利用美国国家家庭出行调查(national household travel survey, NHTS)<sup>[21]</sup>的车辆出行特征数据, 生成了小区居民出行需求数据, 结果展示于附录 A 图 A1, 根据居民出行与使用电梯及公共照明设备的关联性计算得到设备的实时负荷曲线。其余公共负荷变化情况由实际测试数据得到, 光伏发电系统的出力通过预测确定, 作为常数输入小区负荷模型。

## 2 居民负荷运行特性模型及舒适度模型

居民刚性负荷参与调度会对居民生活造成较大影响, 如: 家用照明设备负荷、厨房用电设备负荷等。柔性负荷指用电功率或用电时间可以灵活变动的设备负荷, 因此当电网需要负荷参与需求侧响应时, 这类负荷将成为良好的可调度资源。

### 2.1 智能居民小区柔性负荷模型

#### 2.1.1 温控负荷模型

考虑到大部分温控设备可调度潜力不足, 本文温控设备仅考虑 AC, 同时考虑到不同类型 AC 市场占有率情况及 AC 运行时不同工作状态持续时长<sup>[9]</sup>, 本文主要对变频 AC 稳态工况做出分析, 第  $a$  台 AC 稳态运行的负荷  $L_a^{AC}(t)$  为

$$L_a^{AC}(t) = \left| \theta_{out}(t) - \theta_{a,best}(t) \right| A / \varepsilon_a, \quad t \in S_T \quad (1)$$

式中:  $A$  为导热系数, 单位为  $\text{kW}/^\circ\text{C}$ , 基于对我国现有房屋建筑材料导热系数和被试小区的建筑结构综合分析, 本文取值 0.18;  $\theta_{out}(t)$  为  $t$  时段室外温度;  $\theta_{a,best}(t)$  为  $t$  时段第  $a$  台 AC 的原设定温度;  $\varepsilon_a$  为第  $a$  台 AC 制冷效率, 根据 AC 型号不同取值不同, 具体取值见附录 A 表 A1;  $S_T$  为调度周期内的时段数集合。

#### 2.1.2 可平移负荷模型

可平移负荷指能够根据需求或系统运行要求,

灵活调整运行时段的电力负荷。具有一旦开启不可中断, 单次使用期间能耗总量及运行期间的功率曲线与平移前的运行特性保持一致, 本文的可平移负荷设备为洗衣机(clothes washer, CW)、烘干机(clothes dryer, CD)、洗碗机(dishwasher, DW)。假设每台可平移负荷设备每次运行时长和运行功率一致, 第  $b$  台设备运行约束可表示为<sup>[22]</sup>

$$\sum_{j=t}^{t+T_b-1} x_b(j) \geq y_b(t) T_b, \quad t \in S_T \quad (2)$$

$$\sum_{t_x=\alpha_b}^{\beta_b} x_b(t_x) = T_b, \quad \alpha_b \in S_T, \beta_b \in [T_b, S_T + T_b - 1] \quad (3)$$

$$\sum_{t=\alpha_b}^{\beta_b} y_b(t) = 1 \quad (4)$$

式中:  $x_b(t_x)$ 、 $y_b(t)$  为 0-1 变量;  $x_b(t_x)$  表示设备  $b$  在  $t_x$  时段是否运行, 为 1 表示设备  $b$  在  $t_x$  时段运行;  $y_b(t)$  表示设备  $b$  在  $t$  时段是否启动, 为 1 即设备  $b$  在  $t$  时段启动;  $x_b(j)$  表示可平移负荷设备  $b$  在  $j$  时段运行状态;  $T_b$  为设备单次运行时长;  $\alpha_b$  为设备的启动时段;  $\beta_b$  为设备的运行结束时段。本文模型总调度周期为 24 h, 考虑到可平移负荷设备可能出现跨天运行的情况, 调度周期保持不变, 设备调度仿真运行时间范围取决于调度周期内开启且最后结束运行的可平移负荷设备。

#### 2.1.3 限时连续可调节负荷

限时连续可调节负荷的特点为工作时功率可以调节甚至中断, 但在设定的时间范围内必须完成一定能耗量的工作, 如功率可调的充电电池、充电功率可调节的电动汽车等。本文中实验小区所含限时连续可调节负荷设备为电动汽车, 其运行约束为

$$x_e(t) L_{e,min} \leq L_e(t) \leq x_e(t) L_{e,max} \quad (5)$$

$$\sum_{t=\alpha_e}^{\beta_e} L_e(t) \eta_e \Delta t \geq R_e, \quad \alpha_e, \beta_e \in S_T \quad (6)$$

$$L_e(t) = 0, \quad t \notin [\alpha_e, \beta_e] \quad (7)$$

式中:  $x_e(t)$  为 0-1 变量, 表示  $t$  时段第  $e$  台 EV 是否处于充电状态, 为 1 表示第  $e$  台 EV 在  $t$  时段充电;  $L_{e,min}$  表示第  $e$  台 EV 的充电功率可调下限;  $L_{e,max}$  表示第  $e$  台 EV 的充电功率可调上限, 即设备额定功率;  $L_e(t)$  为第  $e$  台 EV 实时充电功率;  $\eta_e$  为第  $e$  台 EV 充电效率;  $\Delta t$  为时间间隔;  $[\alpha_e, \beta_e]$  为第  $e$  台 EV 与用户约定的可充电时间范围;  $R_e$  为第  $e$  台 EV 在约定时间内需要达到的电量; 式(7)为第  $e$  台 EV 用户要求的充电时间段约束。

## 2.2 居民用户舒适度模型

用户对限时连续可调节负荷的要求仅为在预定

时间内完成充电, 调度对舒适度影响不大, 故在本文中不考虑其舒适度变化。温控负荷及可平移负荷调度的舒适度模型以韦伯-费希纳定律<sup>[20]</sup>为基础, 考虑了用户在温度或时间因调度发生偏移时舒适度变化的边际效应, 描述了偏移量和舒适度的非线性关系。

### 2.2.1 温控负荷舒适度模型

对温控负荷而言, 调度后的设定温度距离原习惯设定温度的偏移量越大, 用户舒适度越低, 同时敏感度降低。因此, 可采用调节后设定温度与原设定温度相较外界环境温度差值的比率建立温控负荷的归一化舒适度模型, 如式(8)和式(9)所示。

$$D_a = \frac{\sum_{t=1}^{S_T} |\theta_{a,best}(t) - \theta_{a,set}(t)| x_a(t)}{\sum_{t=1}^{S_T} |\theta_{out}(t) - \theta_{a,best}(t)| x_a(t)} \quad (8)$$

$$\theta_{a,set}(t), \theta_{a,best}(t) \in [18^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}]$$

$$U_a^{AC} = e^{-D_a} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $D_a$  为第  $a$  台 AC 调节后设定温度与原设定温度相较外界环境温度差值的比率;  $\theta_{a,set}(t)$  为第  $a$  台 AC 调度后的设定温度, 受到 AC 可调节范围 $[18^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}]$ 的限制;  $x_a(t)$  为 0-1 变量, 表示  $t$  时段第  $a$  台 AC 是否启用,  $x_a(t)=1$  即第  $a$  台 AC 在  $t$  时段处于

启用状态;  $U_a^{AC}$  代表第  $a$  台 AC 的归一化舒适度, 与  $D_a$  呈指数关系<sup>[23]</sup>。

### 2.2.2 可平移负荷舒适度模型

可平移负荷设备调度后的启动时间将偏离用户习惯的原启动时间, 用户舒适度降低, 敏感度降低。因此, 可采用负荷的延迟时段数与可调时段数比值建立模型, 如式(10)所示。

$$U_b^{SL}(t_{SL}) = \begin{cases} \sum_{t_0=1}^{S_T} P_b(t_0) e^{-\left(\frac{t_0-t_{SL}}{t_0}\right)} \times 100\%, & t_{SL} \leq t_0 \\ \sum_{t_0=1}^{S_T} P_b(t_0) e^{-\left(\frac{t_{SL}-t_0}{S_T-t_0}\right)} \times 100\%, & t_{SL} > t_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $t_{SL}$  为设备  $b$  调度后的启动时段;  $U_b^{SL}(t)$  代表设备  $b$  在  $t_{SL}$  时段的归一化舒适度, 与时间偏差比例呈指数关系;  $t_0$  为设备  $b$  的原启动时段;  $P_b(t_0)$  为用户在  $t_0$  时段开启的习惯强度。

## 3 智能居民小区负荷调度控制策略

结合基于前景理论构建的决策价值模型、电网公布的政策数据及相关预测数据, 提出了一种基于前景理论的智能居民小区用电负荷日前随机优化调度模型, 如图 3 所示。

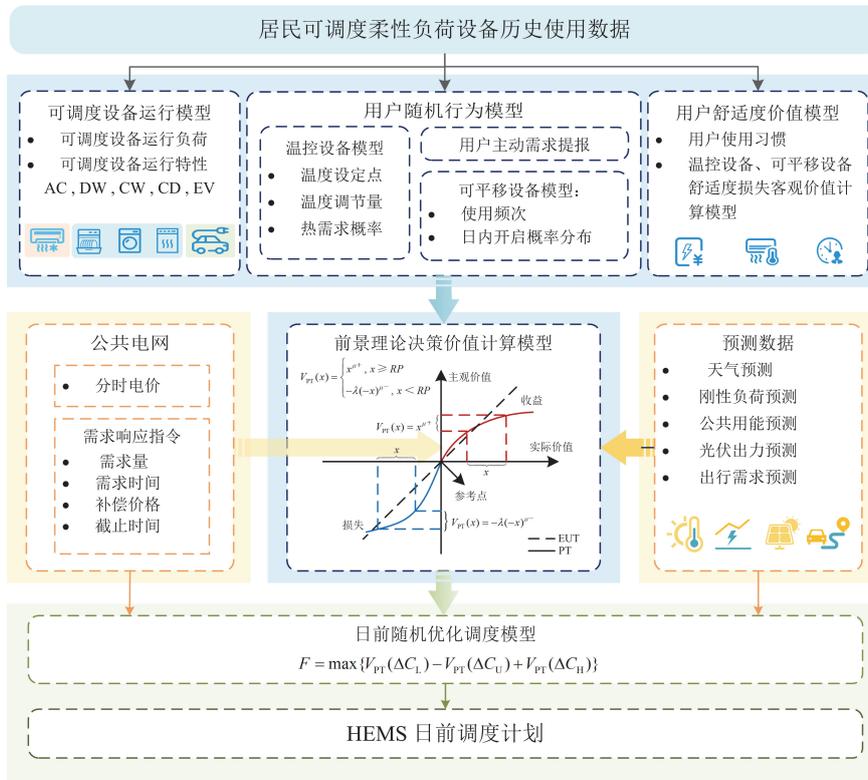


图 3 基于前景理论的日前随机优化调度框架

Fig. 3 Day-ahead stochastic optimization scheduling framework based on prospect theory

该模型主要由 7 个模块组成: 可调度设备运行模型、用户舒适度价值模型、用户随机行为模型、预测数据模块、公共电网模块、前景理论决策价值计算模型、日前随机优化调度模型。初始的居民可调度柔性负荷设备运行数据及居民用户使用情况数据基于国家可再生能源实验室(national renewable energy laboratory, NREL)数据集<sup>[24]</sup>生成。可调度设备运行模型构建了小区不同可调度设备的运行模型; 用户舒适度价值模型用于计算用户参与调度前后的舒适度价值变化; 用户随机行为模型用于输入用户的随机行为信息, 包括热舒适度偏好、可平移负荷设备的历史使用频次及习惯强度、用户主动提报的用能需求; 预测数据模块用于预测不可调度的负荷、天气信息、光伏出力数据、居民出行需求数据等; 公共电网模块输入电网日前公布的分时电价及需求响应相关信息; 前景理论决策价值计算模型用于计算调度产生的客观价值变化带来的主观价值变化; 日前随机优化调度模型根据决策价值制定用户日前调度计划, 输入用户的 HEMS。

本文将用户成本变化、舒适度价值变化和所获需求响应补偿分别放入不同的心理账户, 通过舒适度价值损失模型量化舒适度价值损失, 基于前景理论构建主观决策价值模型, 同时考虑用户用电行为和习惯的不确定性构建日前随机调度模型。

### 3.1 经典前景理论

经典前景理论提出决策主体在决策过程中处于有限理性状态, 其决策基于对决策获益的整体感知, 而非一味地追求最大效用, 同时量化地描述了其有限理性状态产生的影响<sup>[14]</sup>。理论有 3 个重要参数: 1) 参照点(reference point, RP); 2) s 型价值函数(s-shape value function); 3) 概率扭曲。前景理论价值函数及参照点如图 3 中前景理论价值函数部分所示。图中  $V_{PT}(x)$  表示某决策事件下实际价值变化量为  $x$  的决策的前景价值;  $\mu^+$  和  $\mu^-$  分别为增益和损失的敏感度参数, 考虑到本文中政策颁布时间为调度周期开始之前, 且作为固定值输入模型, 故本文中敏感度参数取固定值为 0.88;  $\lambda$  为损失厌恶参数, 一般取值范围在 2~2.5 之间<sup>[25-26]</sup>; RP 为参考点, 其值为 0。本文中居民可视为有限理性群体, 满足前景理论主体前提, 因此可以基于前景理论进行分析。

### 3.2 基于前景理论的小区用户决策价值模型

本文基于经典前景理论, 在过去研究的基础上, 通过舒适度损失价值模型使舒适度与其他经济性指标具有可比性, 同时用 PT 价值函数替代 EUT 效用价值函数。分时电价、需求响应补偿价格、需求政策在调度周期开始前已知, 场景参数唯一, 故本文

不考虑概率失真的影响, 模型假设调度前的原始值为参考点。

#### 3.2.1 居民小区用电成本前景决策价值计算

用电成本考虑小区内的所有负荷因光伏出力部分在小区内完全消化, 故用电成本为消纳光伏后从电网实际购入电能的用电成本。

$$\Delta L(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{c=1}^{n_A} (L'_{k,c}(t) - L_{k,c}(t)) \quad (11)$$

$$\Delta C_L(t) = \Delta L(t) \times C_{TOU}(t) \times \Delta t \quad (12)$$

$$\Delta C_L = \sum_{t \in S_T} \Delta C_L(t) \quad (13)$$

式中: 设备共分为  $n$  组, 组内可参与调度的设备共计  $n_A$  台;  $\Delta L(t)$  为  $t$  时段可调度设备用电负荷的实时改变总量;  $L'_{k,c}(t)$ 、 $L_{k,c}(t)$  分别为调度前、后第  $k$  组第  $c$  台设备  $t$  时段的实时负荷;  $C_{TOU}(t)$  为  $t$  时段的分时电价;  $\Delta t$  为时间间隔;  $\Delta C_L(t)$  为  $t$  时段用电成本实时改变总量;  $\Delta C_L$  为小区接受调度前后节省的实际用电总成本, 用电成本增加则价值变化为负, 反之为正。以原用电成本为参考点, 用电成本前景决策价值  $V_{PT}(\Delta C_L)$  为

$$V_{PT}(\Delta C_L) = \begin{cases} \Delta C_L^{\mu^+}, \Delta C_L \geq 0 \\ -\lambda_l (-\Delta C_L)^{\mu^-}, \Delta C_L < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\lambda_l$  为计算用电成本前景决策价值的损失厌恶参数, 取值为 2.25。

#### 3.2.2 舒适度前景决策价值模型

温控设备及可平移负荷设备进行调度时, 将影响到用户的舒适度, 对于用户来说, 对设备的使用付费包括必要的功能需求和提升生活品质的需求两部分, 考虑舒适度同样具备商品属性, 对其价值进行刻画与衡量。用户使用温控设备时, 本质是希望购买热舒适度这一商品, 则调度后降低的舒适度可视作用户的价值损失。而对于可平移负荷设备, 用户所付电费包括功能性价值和习惯舒适度价值两个部分, 打破其原使用习惯将造成用户的舒适度价值损失。

##### 1) 温控负荷舒适度前景决策价值模型

温控设备 AC 的使用过程中, 不同的用户个体热偏好具有差异性, 通过对 NREL 数据集中建筑条件近似的 1799 户的 AC 使用情况进行调查, 以用户惯用的温度设定为最舒适温度点, 每台 AC 实时总用电成本差距即用户为热舒适度的实际付费金额。对于用户而言, 调度使 AC 的设定温度偏离最舒适的温度, 用户舒适度呈损失状态, 其损失的舒适度主观价值模型为

$$C_{U,a}^{AC}(t) = x_a(t) L_a^{AC}(t) C_{TOU}(t) \Delta t \quad (15)$$

$$\Delta C_{U,a}^{AC}(t) = C_{U,a}^{AC}(t) (U_a^{AC} - 1) \quad (16)$$

式中:  $C_{U,a}^{AC}(t)$  为  $t$  时段第  $a$  台 AC 热舒适度实际支付的总费用;  $\Delta C_{U,a}^{AC}(t)$  为  $t$  时段第  $a$  台 AC 接受调度后损失的舒适度实际价值, 相应的舒适度前景决策价值  $V_{PT}(\Delta C_U^{AC})$  为

$$V_{PT}(\Delta C_U^{AC}) = \sum_{a=1}^{n_{AC}} -\lambda_a^{AC} \left( -\sum_{t \in S_T} \Delta C_{U,a}^{AC}(t) \right)^{\mu^-}, \Delta C_U^{AC} < 0 \quad (17)$$

式中:  $\lambda_a^{AC}$  表示第  $a$  台 AC 的损失厌恶参数;  $\Delta C_U^{AC}$  表示所有 AC 接受调度后用户损失的舒适度实际价值。AC 共计  $n_{AC}$  台, 日常对舒适温度控制要求更精准的用户对温度变化的敏感度更高, 热舒适度需求更高, 此时同等程度舒适度客观价值损失带来的主观价值损失更大。根据用户 AC 自主设定的温度调节幅度, 通过层次分析法确定不同使用习惯的用户设备的  $\lambda_a^{AC}$  取值, 具体见附录 A 表 A1。

## 2) 可平移负荷舒适度前景决策价值模型

可平移负荷设备舒适度受其开启时间及用户原使用习惯强度的影响, 若仅考虑满足设备的基本功能性的用能费用(即低谷电价时段内的用能成本), 则可平移负荷设备舒适度价值模型为

$$\gamma_b^U = P_b^{pk} C_{TOU}^{pk} - P_b^{vl} C_{TOU}^{vl} \quad (18)$$

$$\Delta C_{U,b}^{SL} = \sum_{t \in S_T} [U_b^{SL}(t) - 1] \gamma_b^U R_b^{SL}, t \in S_T \quad (19)$$

式中:  $\gamma_b^U$  为第  $b$  台可平移负荷设备基于历史习惯强度的用能舒适度单价;  $P_b^{pk}$  为第  $b$  台可平移负荷设备在高峰电价期间开启的概率;  $P_b^{vl}$  为第  $b$  台可平移负荷设备在低谷电价期间开启的概率;  $C_{TOU}^{pk}$ 、 $C_{TOU}^{vl}$  分别为分时电价中的高峰电价和低谷电价;  $R_b^{SL}$  为第  $b$  台可平移负荷设备单次使用总耗电量;  $\Delta C_{U,b}^{SL}$  为第  $b$  台可平移负荷设备调度后基于习惯强度的舒适度实际损失费用。

可平移负荷设备调度后损失的舒适度价值  $V_{PT}(\Delta C_U^{SL})$  为

$$V_{PT}(\Delta C_U^{SL}) = \sum_{b \in n_{SL}} -\lambda(-\Delta C_{U,b}^{SL})^{\mu^-} \quad (20)$$

式中:  $n_{SL}$  为调度周期内可调度的可平移负荷设备总数;  $\lambda$  取值为 2.25;  $\Delta C_U^{SL}$  表示所有可平移负荷设备接受调度后损失的舒适度实际价值。

综上所述, 设置温控设备 AC 的最舒适温度和可平移负荷设备的原习惯启动时间为参考点, 则该值为负, 即偏移用户最舒适状态时, 舒适度总是损

失的, 用户损失的总舒适度价值  $V_{PT}(\Delta C_U)$  为

$$V_{PT}(\Delta C_U) = V_{PT}(\Delta C_U^{AC}) + V_{PT}(\Delta C_U^{SL}) \quad (21)$$

式中:  $\Delta C_U$  表示所有 AC 和可平移负荷设备接受调度后损失的舒适度实际价值。

## 3.2.3 需求响应补偿前景决策价值模型

小区负荷参与电网的需求响应, 根据电网发布的日前需求, 考虑用户需求及负荷运行情况进行报送, 以调度日前 5 日的平均负荷曲线为基线, 根据小区实际按政策需要变动的负荷总量进行补偿, 补偿金额计算公式为

$$\Delta C(t_H) = \begin{cases} \max\{0, [L_c(t_V) - L'_c(t_V)]\} \times C_V^H \\ \max\{0, [L'_c(t_P) - L_c(t_P)]\} \times C_P^H \end{cases} \quad (22)$$

$$\Delta C_H = \sum_{c \in n_A} \sum_{t_H \in T_H} \Delta C(t_H) \quad (23)$$

式中:  $\Delta C(t_H)$  为需求响应实时补偿实际金额;  $t_V$  为填谷补偿时间段;  $t_P$  为削峰补偿时间段;  $L'_c(t_V)$ 、 $L_c(t_V)$  分别为设备  $c$  需求响应填谷时段调度前后实时负荷值;  $L'_c(t_P)$ 、 $L_c(t_P)$  分别为设备  $c$  需求响应削峰时段调度前后实时负荷值;  $C_V^H$ 、 $C_P^H$  分别为填谷和削峰时段需求响应补偿单价;  $\Delta C_H$  为小区所获需求响应补偿实际总金额;  $t_H$  为削峰填谷补偿时间段;  $T_H$  为削峰填谷时间。前景理论需求响应补偿前景决策价值模型如式(24)所示。

$$V_{PT}(\Delta C_H) = \Delta C_H^{\mu^+}, \Delta C_H \geq 0 \quad (24)$$

## 3.3 日前随机优化模型

### 3.3.1 聚类方法与分组策略

根据用户热偏好的不同及 AC 设备功率类型的不同, 将 AC 分类为不同组, 分别统计不同组别的设备数量。可平移负荷设备根据不同的单次工作时长及额定功率, 采用高斯混合模型(Gaussian mixture models, GMM)聚类算法对用户设备运行特性数据进行分类, 所得的混合系数和聚类中心可以反映出不同类别的运行参数和所属分类的设备数量占比, 再根据开启频次和习惯强度进行二级分组。该分组方法可以反映出不同的设备特性以及用户使用行为习惯, 便于调度方案的制定和设备的统一管理。

### 3.3.2 目标函数及约束条件

居民负荷聚合商管理小区时, 其目标函数为综合考虑居民小区用电成本、舒适度与需求响应补偿 3 方面前景决策价值的总前景决策价值。

$$F = \max\{V_{PT}(\Delta C_L) - V_{PT}(\Delta C_U) + V_{PT}(\Delta C_H)\} \quad (25)$$

小区用能应满足功率平衡约束和考虑运行安全的购电限制约束。

## 1) 功率平衡约束公式

$$P_{\text{buy}}(t) = P^{\text{RES}}(t) + P^{\text{COM}}(t) - P^{\text{PV}}(t), t \in S_T \quad (26)$$

$$P^{\text{RES}}(t) = P^{\text{AC}}(t) + P^{\text{SL}}(t) + P^{\text{EV}}(t) + P^{\text{RL}}(t), t \in S_T \quad (27)$$

式中:  $P_{\text{buy}}(t)$  为  $t$  时段内居民负荷聚合商购电功率;  $P^{\text{RES}}(t)$  为  $t$  时段内居民用电负荷;  $P^{\text{COM}}(t)$  为  $t$  时段内公共用能负荷;  $P^{\text{PV}}(t)$  为  $t$  时段光伏出力;  $P^{\text{AC}}(t)$  为  $t$  时段内小区居民家庭 AC 用能负荷;  $P^{\text{SL}}(t)$  为  $t$  时段内居民家中可平移负荷设备用能负荷;  $P^{\text{EV}}(t)$  为  $t$  时段内电动汽车充电负荷;  $P^{\text{RL}}(t)$  为  $t$  时段内小区居民刚性负荷。

为保证小区各设备安全运行, 小区  $t$  时段购电功率应受到变压器总容量限制。因此, 将居民负荷聚合商的购电功率  $P_{\text{buy}}(t)$  限制在 0 到  $P_{\text{buy}}^{\text{max}}$  之间,  $P_{\text{buy}}^{\text{max}}$  为考虑变压器总容量限制的居民负荷聚合商最大购电功率。

## 2) 考虑运行安全的购电限制约束

$$0 \leq P_{\text{buy}}(t) \leq P_{\text{buy}}^{\text{max}}, t \in S_T \quad (28)$$

## 3) 居民用户可调度设备运行约束

可平移负荷设备调度周期内的开启状态则根据用户历史使用习惯强度及本次调度周期前的  $D$  个调度周期的开启状态共同决定, 如式(29)所示。

$$P_{\text{on}}^{\text{SL}} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,D} & \cdots & p_{1,D_{\text{max}}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{b,1} & \cdots & p_{b,D} & \cdots & p_{b,D_{\text{max}}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{m,1} & \cdots & p_{m,D} & \cdots & p_{m,D_{\text{max}}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中:  $p_{\text{on}}^{\text{SL}}$  为小区中  $m$  台可平移负荷设备间隔  $x$  天未开启且次日开启的概率矩阵;  $D_{\text{max}}$  为日常情况下未开启最长间隔天数; 矩阵中  $p_{b,D}$  表示第  $b$  台可平移负荷设备间隔  $D$  天未开启次日开启的概率,  $p_{b,D} \geq 80\%$  则视作设备  $b$  次日开启; 小区各设备其余运行特性约束已在前文给出。

温控设备开启台数由实时外界温度、居民不同温度下热舒适需求信息、各时段住宅内实际在场人数共同决定。

限时可调节设备总充电时长受到车辆并网离网的时间限制及充电桩额定功率的限制。

## 3.4 非凸混合整数非线性问题求解方法

本文根据前景理论建模目标函数, 其中居民小区用电成本前景决策价值、舒适度前景决策价值、需求响应补偿前景决策价值均存在指数项, 且幂指数的存在使优化调度问题成为非凸混合整数非线性优化

问题(non-convex mixed integer nonlinear programming problem, NMINLP), 求解器无法进行求解。为此, 本文改进了二进制拓展法<sup>[27]</sup>对文中的非凸非线性部分进行局部离散等效。同时本文模型变量可设置为整数变量集合, 其解空间与原连续变量模型的可行域保持拓扑同构性, 因此算法收敛所得最优解与原始 NMINLP 模型的全局最优解具有数学等价性。

方法具体步骤如下: 对每个非线性连续项  $V_{\text{pr}}(x)$ , 通过离散步长将其转化为有边界的变量来实现离散化。将调度中的目标量变化界限范围内的所有可能性分别算出。

1) 通过一系列离散变量  $x_i$ , 以及其对应的函数值  $f(x_i)$ , 形成  $T = \{x_i, f(x_i) | i = 1, 2, \dots, n_T\}$  的矩阵表格, 其中  $n_T$  表示离散点的数量。

2) 将决策变量  $y$  同样用一系列离散变量  $y_q$  乘以一系列二进制变量  $z_q$  的总和  $\sum_q y_q z_q$  实现替代。

3) 在系列值中总有一个最接近的整数值  $y_q$ , 通过以下方法来逼近取值, 如式(30)所示。

$$y - \frac{\Delta y_q}{2} \leq \sum_q y_q z_q \leq y + \frac{\Delta y_q}{2} \quad (30)$$

式中:  $\Delta y_q = y_{q+1} - y_q$ , 仅有最接近  $y$  的  $y_q$  值其所乘的二进制系数  $z_q = 1$ , 其余为 0。

4) 求得对应的  $x_q = y_q$ , 查表得到对应的  $f(x_q)$ , 即可求得  $V_{\text{pr}}(y)$ 。

## 4 算例分析

## 4.1 参数设置

算例选取基于甘肃实际居民住宅小区参数的智能化小区作为测试对象(后文简称小区)。算法层面采用 Python3.11.6 环境及 MATLAB 2024a 环境下的 Gurobi 11.0 解决相关 NMINLP。小区共计 4600 余人, 1464 户, 选用居民典型工作日生活作息, 居民家中均视作装有 HEMS。选取当日 00:00 到次日 00:00 为一个调度周期, 将周期分为  $S_T = 96$  段,  $\Delta t$  为 15 min, 经典分时电价及需求响应补贴见表 1。

## 1) 温控设备相关参数

不同室外温度下热舒适度需求人数占比如附录 A 图 A2 所示, 数据通过美国采暖、制冷与空调工程师学会(American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, Inc., ASHRAE)所采集的数据集<sup>[28]</sup>统计得到。典型日小区当日室外温度变化如附录 A 图 A1 所示。不同住户的个性热偏好设定参数及 AC 设备相关参数见附录 A 表 A1。

表 1 经典分时电价及需求响应补贴

Table 1 Classic time-of-use price and demand response compensation

时间段	分时电价/(元/kWh)	补偿价格/(元/kWh)
06:00—12:00	0.617	0
12:00—14:00	0.617	3(削峰补偿)
14:00—22:00	0.617	0
22:00—03:00	0.307	0
03:00—06:00	0.307	1.2(填谷补偿)

2) 可平移负荷设备相关参数

日内时段开启概率即设备使用的习惯强度，其分布如附录 A 图 A3 所示，设备单次运行功率见附录 A 表 A2。可平移负荷设备出现跨周期运行时，若该设备启动时段位于调度周期内，则将决策价值成本全部计算在本周期内，剩余运行负荷作为固定负荷累积到下一周期，但在下一周期内不再参与决策价值计算。

3) 电动汽车相关参数

根据现场调查，测试小区电动汽车共计 210 辆，从统计数据来看，电动汽车并网和离网时间的概率分布总结为柱状图，如图 4 所示。车辆 SOC 充电目标设定为 0.9，额定充电容量为 100 kWh；充电桩最大功率为 7 kW，充电效率系数为 0.95，每辆电动汽车每天所需的充电电量根据 NHTS 数据集<sup>[21]</sup>得出。

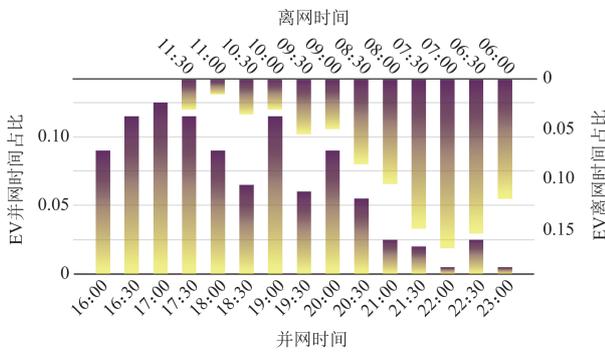


图 4 EV 并网离网时间概率分布

Fig. 4 Probability distribution of EV grid connection and disconnection time

4. 2 算例结果

4.2.1 基于 PT 的日前随机优化调度结果分析

基于 PT 的优化调度前后 AC 设定温差及总负荷如图 5 所示。温控设备 AC 经调度产生设定温度偏差的时间段主要为电网削峰填谷的需求阶段，填谷期间调度前后期望温差最高为 2 °C，填谷负荷最高为 634.52 kW，平均填谷负荷为 539.88 kW，削峰期间期望温差最高为 7 °C，削峰峰值负荷为 1565.40 kW，

平均削峰负荷为 1533.72 kW。

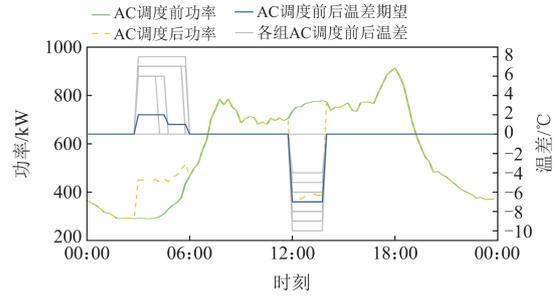


图 5 基于 PT 的优化调度前后 AC 设定温差及总负荷  
Fig. 5 AC set temperature differential and total load before and after PT-based optimal scheduling

基于 PT 的优化调度前后可平移负荷实时开启台数及总负荷如图 6 所示，可平移负荷设备调度前实时开启台数为考虑习惯强度的期望实时开启台数，开启时间主要分布于 07:00—22:00 的高峰电价时间段内，调度后主要集中于 03:00—06:00 开启，此时段为填谷补偿时段，填谷峰值负荷为 322.49 kW，平均填谷负荷为 124.27 kW，填谷效果显著。

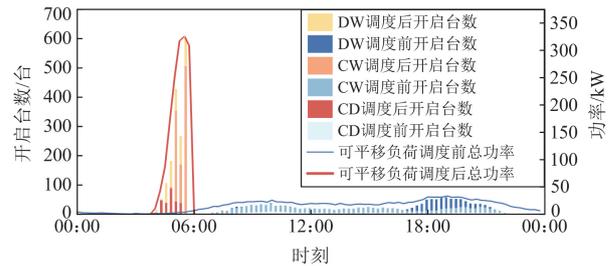


图 6 基于 PT 的优化调度前后可平移负荷  
实时开启台数及总负荷

Fig. 6 Real-time operating units and total load of shiftable loads before and after PT-based optimal scheduling

EV 属于限时可调节负荷，并离网时间分布已在图 4 中给出，调度结果如图 7 所示，调度前 EV 采用即插即充模式，以最短时间达到设定的 SOC 为目

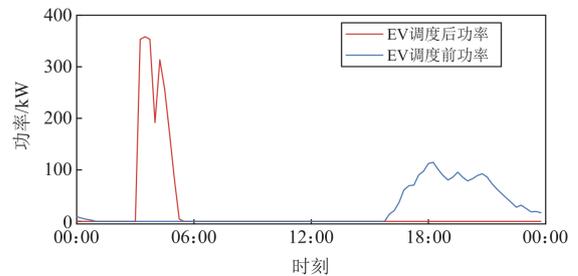


图 7 基于 PT 的优化调度前后 EV 充电总负荷变化  
Fig. 7 Changes in total EV charging load before and after PT-based optimal scheduling

标, 调度后充电负荷集中于 03:00—06:00 时段附近, 填谷负荷峰值为 358.49 kW, 均值为 231.70 kW。

本文所研究的温控负荷设备、可平移负荷设备和限时可调节负荷设备在调度过程中表现出显著的系统负荷波动平抑效果, 能够有效实现需求响应优化目标。

#### 4.2.2 基于 EUT 和 PT 的优化调度方法对比

##### 1) 需求响应削峰填谷收益对比分析

传统火电机组在尖峰负荷显著时, 系统成本会急剧上升, 此时所颁布的需求响应政策需求多以削峰填谷为主。在兼顾小区自身峰谷差的情况下参与需求响应进行小区优化调度, 基于 EUT 或 PT 的优化调度后小区负荷情况及所获需求响应补偿情况如图 8 所示。

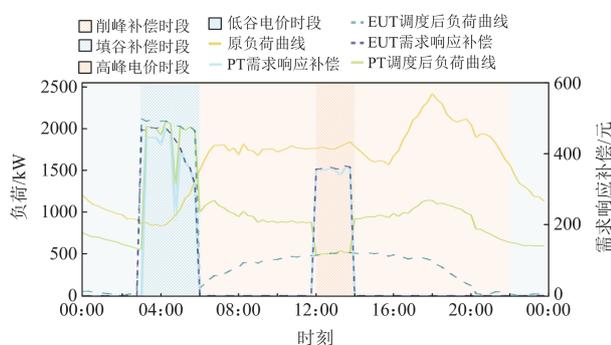


图 8 基于 EUT 和 PT 的优化调度模型削峰填谷效果和需求响应补偿变化对比

Fig. 8 Comparison of peak shaving, valley filling effects, and DR changes based on EUT and PT optimization models

电网削峰需求期间, 基于 EUT 的优化调度负荷各时段平均降低 479.51 kW, 周期内共计 959.02 kWh, 获得补偿 2877.07 元; 基于 PT 的优化调度负荷各时段平均降低 471.96 kW, 周期内共计 943.93 kWh, 获得补偿 2831.78 元。填谷需求期间, 基于 EUT 的优化调度负荷各时段平均升高 1440.15 kW, 周期内共计 4320.45 kWh, 获得补偿 5184.54 元; 基于 PT 的优化调度负荷各时段平均升高 1212.00 kW, 周期内共计 3636.00 kWh, 获得补偿 4363.20 元。

##### 2) 用电成本及舒适度变化对比分析

受到源侧改革建设的影响, 火电机组比例逐年下降, 由燃气机组和新能源设备替代, 需求响应的具体要求将从削峰填谷逐渐转为降低系统运行成本。对小区而言, 该政策需求的等效具体实践为降低自身用电成本, 小区基于 EUT 和 PT 的日前随机优化调度用电成本对比结果如图 9 所示。

调度周期内, 基于 EUT 的优化调度用电成本为 5446.03 元, 较原成本降低 15 386.02 元, 占比 73.85%;

基于 PT 的优化调度用电成本为 11 522.06 元, 较原成本降低 9309.99 元, 占比 44.70%。小区原总舒适度价值为 18 458.2 元, 基于 EUT 的优化调度小区内总舒适度价值降低 11 038.24 元, 周期平均舒适度损失占比 27.21%, 舒适度损失峰值为 54.31%, 此情况下可能用户群体会因舒适度的损失过高而拒绝参与调度; 而基于 PT 的优化调度小区内总舒适度价值仅降低 1162.40 元, 周期平均舒适度损失占比仅 3.02%, 舒适度损失峰值仅 34.76%, 用户舒适度损失显著减少。

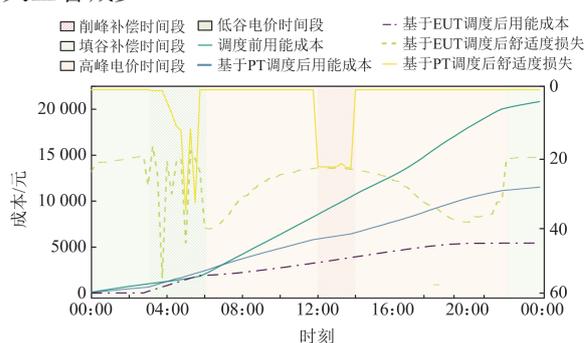


图 9 基于 EUT 和 PT 的优化调度模型用电成本及舒适度变化对比

Fig. 9 Comparison of electricity costs and comfort changes based on EUT and PT-based optimization models

##### 3) 各组设备实时舒适度价值损失对比

基于 EUT 和 PT 的优化调度中, 温控设备和可平移负荷设备调度前后各组设备实时舒适度损失价值比例如图 10 所示。可平移负荷设备的舒适度变化不大, 但对于可调度潜力较大的温控设备而言, 从设备分组来看: 基于 EUT 的优化调度中所有组的日平均舒适度损失率超过 50.78%, 当损失过高时, 用户可能会拒绝此设备参与调度; 而在基于 PT 的优化调度中, 日均损失度最高的也仅有 10.61%, 且其余组的日均舒适度损失也在 4.46% 以下。从实时舒适度变化的角度看, 基于 EUT 的优化调度中超过一半时间 (> 50%) 用户舒适度损失在 53.80% 以上; 而基于 PT 的优化调度在 91.31% 的时间内未损失舒适度, 且舒适度损失超 50% 的时间仅占 1.32%。基于 EUT 的优化调度小区所有用户主观的决策价值总值为 -5714.4 元, 呈现损失状态; 基于 PT 的优化调度的主观决策价值总值则为 1928.3 元, 呈现为收益状态。

基于 EUT 的控制策略的预期效用相较实际情况有所夸大, 不考虑用户有限理性的情况下用电成本可以大幅降低, 但实际上随着舒适度的急剧下降, 用户的响应意愿也会急剧下降。当参与调度的总体主观价值呈现损失状态, 用户可能会拒绝参加需求

响应,基于 EUT 的日前随机优化调度模型的决策预期结果将与实际情况相悖。而基于 PT 的日前随机优化调度模型则更多地考虑了居民的有限理性状态及主观需求,极大地改善了居民参与需求响应时的决策体验,进而提高用户的需求响应积极性。

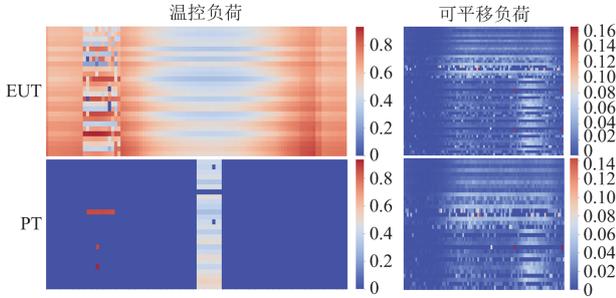


图 10 基于 EUT 和 PT 的优化调度模型各组设备各时段舒适度损失对比

Fig. 10 Comparison of real-time comfort loss for the equipment groups based on EUT and PT optimization models

### 5 结论

本文以居民小区柔性负荷为调度主体,综合分析、建模实际小区负荷情况,建立小区的用能负荷模型和用户可调度设备模型,为未来关于住宅小区居民负荷参与需求响应的优化调度研究提供了可供参考的数据样本。引入舒适度价值概念,计算用户由于调度带来的舒适度价值损失,为量化用户舒适度变化提供新的思路。基于前景理论构建居民小区负荷日前随机优化调度模型,完成基于 EUT 优化调度模型的决策情况与实际决策情况之间差异的刻画。对所构建的非凸混合整数非线性模型采用改进二进制拓展法完成求解,为前景理论相关的非凸问题的求解提供方案,确保模型的可实践性,增强模型求解的稳定性,求解时间缩短为原来的 1/10。

通过甘肃实际住宅小区进行模型的算例分析,

得到结论:有限理性状态及个体偏好对参与需求响应时的决策有较大影响。相比于基于 EUT 的优化调度模型,基于 PT 的居民小区负荷日前随机优化模型可在最大限度地保证居民用户的用电舒适度的同时,兼顾居民用户经济效益和电网需求响应。更重要的是模型更真实地反映了调度的发生环境,对理解用户决策行为的发生有一定的参考意义。其后如何设计模型以刻画不同情况下小区用户参与需求响应的用户决策行为仍然值得进一步研究。

### 附录 A

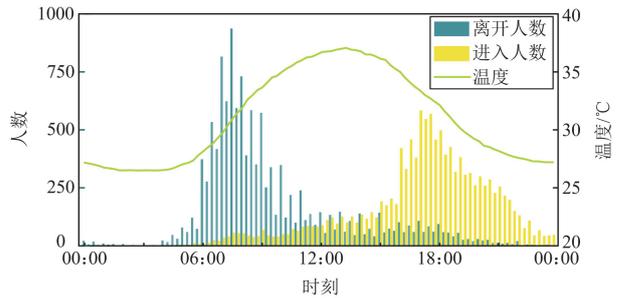


图 A1 典型日室外温度曲线及小区实时进出人数

Fig. A1 Outdoor temperature curve and real-time number of people entering and leaving the community on a typical day

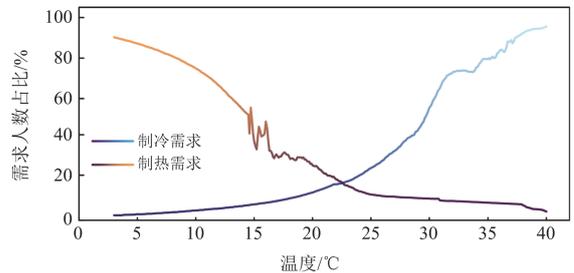


图 A2 不同温度下热舒适度需求人数占比

Fig. A2 Proportion of people with thermal comfort demand at different temperatures

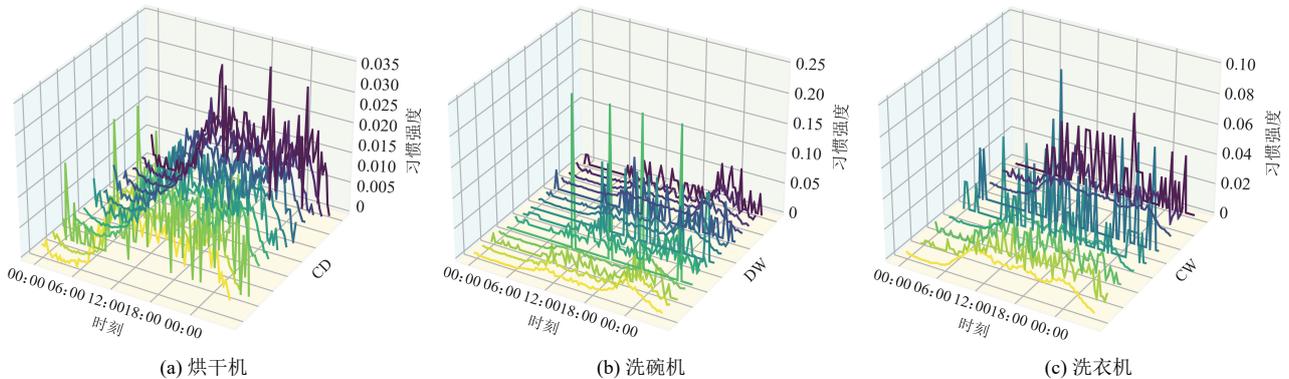


图 A3 用户使用习惯强度

Fig. A3 Usage intensity of user habits

表 A1 AC 设备组相关参数

Table A1 Relevant parameters of AC equipment group

类别	原设定 温度/°C	$\eta$	原调节 温度/°C	损失 系数	占比/%
1	24	3	2	2.11	1.3
2	22	3	2	2.11	1.5
3	23	3	5	2.27	1.6
4	22	2.8	5	2.27	1.7
5	21	2.8	5	2.27	1.7
6	25	3	2	2.11	1.7
7	21	3	2	2.11	1.8
8	25	2.8	5	2.27	1.9
9	20	2.8	0	2	2.1
10	23	3	2	2.11	2.1
11	24	2.8	2	2.11	2.1
12	26	2.8	0	2	2.3
13	24	3	0	2	2.4
14	23	2.8	5	2.27	2.7
15	22	3	0	2	3.2
16	25	2.8	2	2.11	3.2
17	22	2.8	2	2.11	3.3
18	21	2.8	2	2.11	3.8
19	25	3	0	2	3.9
20	24	2.8	0	2	4.2
21	21	3	0	2	4.9
22	23	2.8	2	2.11	6.4
23	25	2.8	0	2	6.4
24	23	3	0	2	7.0
25	22	2.8	0	2	7.8
26	21	2.8	0	2	7.9
27	23	2.8	0	2	11.2

表 A2 可平移设备组参数

Table A2 Relevant parameters of shiftable load device group

类别	运行时长/段	占比/%	额定功率/kW
CW1	2	48.89	0.1346
CW2	2	1.78	0.2327
CW3	2	2.48	0.3094
CW4	3	13.56	0.1311
CW5	3	0.38	0.2362
CW6	3	0.25	0.2961
CW7	4	29.79	0.1213
CW8	4	2.29	0.2101
CW9	4	0.57	0.3158
CD3A1	3	9.01	0.6958
CD3B1	3	14.68	0.3411
CD3C1	3	1.70	1.8138
CD4A1	4	9.72	0.5766
CD4B1	4	16.81	0.3154
CD4C1	4	4.47	1.1313

续表 A2

类别	运行时长/段	占比/%	额定功率/kW
CD5A1	5	12.91	0.2575
CD5B1	5	4.68	1.0036
CD5C1	5	13.48	0.47
CD6A1	6	6.24	0.2367
CD6B1	6	4.26	0.4287
CD6C1	6	2.06	0.9682
DW1	2	17.86	0.3108
DW2	2	0.41	1.779
DW3	2	4.31	0.4613
DW4	3	22.18	0.3452
DW5	3	0.21	1.553
DW6	3	2.87	0.6806
DW7	4	12.53	0.3201
DW8	4	1.03	0.8576
DW9	4	4.11	0.4136
DW10	5	13.35	0.2948
DW11	5	3.70	0.361
DW12	5	0.82	0.7239
DW13	6	14.37	0.2997
DW14	6	1.03	0.7586
DW15	6	1.23	0.3926

## 参考文献

- [1] 李昭昱, 艾芊. 分时电价下居民用户用电需求响应估计方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 121-127.  
LI Zhaoyu, AI Qian. Demand response estimation method of electricity consumption for residential customer under time of use price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 121-127.
- [2] JHALA K, NATARAJAN B, PAHWA A. Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2809-2819.
- [3] 电力需求侧管理办法(2023年版)[EB/OL]. [https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue\\_10846/202311/content\\_6917319.html](https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10846/202311/content_6917319.html)
- [4] 和萍, 刘鑫, 宫智杰, 等. 高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122.  
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [5] 杨悦, 宋良泰. 考虑用户需求响应的空调负荷日前-实时聚合调控[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(5): 529-537.  
YANG Yue, SONG Liangtai. Day ahead and real time aggregate regulation of air conditioning load on demand response[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 529-537.

- [6] 陈旭, 杨柳, 杨振刚, 等. 住宅小区电动汽车有序充电潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 122-128.  
CHEN Xu, YANG Liu, YANG Zhengang, et al. Assessment of orderly charging potential of electric vehicles in residential areas[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 122-128.
- [7] LUO Z, PENG J, YIN R. Many-objective day-ahead optimal scheduling of residential flexible loads integrated with stochastic occupant behavior models[J]. Applied Energy, 2023, 347.
- [8] 涂京, 周明, 宋旭帆, 等. 居民用户参与电网调峰激励机制及优化用电策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 443-453.  
TU Jing, ZHOU Ming, SONG Xufan, et al. Research on incentive mechanism and optimal power consumption strategy for residential users' participation in peak shaving of power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 443-453.
- [9] 杨秀, 卢炜, 余文昶, 等. 智能小区居民负荷参与优化调度及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 22-34.  
YANG Xiu, LU Wei, YU Wenchang, et al. Optimal dispatching and control strategies for residential load of intelligent communities[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 22-34.
- [10] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [11] LU Q, ZHANG Z, LÜ S. Home energy management in smart households: optimal appliance scheduling model with photovoltaic energy storage system[J]. Energy Reports, 2020, 6.
- [12] YAHIA Z, PRADHAN A. Multi-objective optimization of household appliance scheduling problem considering consumer preference and peak load reduction[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55.
- [13] GAN L, HU Y, CHEN X, et al. Application and outlook of prospect theory applied to bounded rational power system economic decisions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 3227-3237.
- [14] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospective theory: an analysis of decision under risk[J]. Estudios de Psicología, 2014, 8(29).
- [15] 赵海岭, 王维庆, 李笑竹, 等. 发电侧多主体投资低碳综合微网氢储能的演化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 49-62.  
ZHAO Hailing, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Evolution strategy of low carbon integrated microgrid hydrogen energy storage with multi-agents investment on the power generation side[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 49-62.
- [16] WANG Y, SAAD W, MANDAYAM N B, et al. Load shifting in the smart grid: to participate or not?[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2604-2614.
- [17] PENG J, LUO Z, TAN Y, et al. Balancing stakeholder benefits: a many-objective optimal dispatch framework for home energy systems inspired by Maslow's hierarchy of needs[J]. Advances in Applied Energy, 2024, 13.
- [18] AFZALAN M, JAZIZADEH F. Residential loads flexibility potential for demand response using energy consumption patterns and user segments[J]. Applied Energy, 2019, 254.
- [19] JAVADI M S, NEZHAD A E, NARDELLI P H J, et al. Self-scheduling model for home energy management systems considering the end-users discomfort index within price-based demand response programs[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 68.
- [20] MURRAY, DAVID J. A perspective for viewing the history of psychophysics[J]. Behavioral and Brain Sciences, 1993, 16(1): 115-125.
- [21] National household travel survey[EB/OL]. <https://nhts.ornl.gov/con-tact-us>
- [22] CHEN Z, WU L, FU Y. Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1822-1831.
- [23] KHORSANDROO S, NOOR R M, KHORSANDROO S. Stimulus-centric versus perception-centric relations in quality of experience assessment[C] // IEEE Wireless Telecommunications Symposium, April 18-20, 2012, London, UK: 1-6.
- [24] PARKER A, HORSEY H, DAHLHAUSEN M, et al. Renewable energy[EB/OL]. <https://www.nrel.gov/Docs/Fy23osti/83819.Pdf>
- [25] BAKER H K, NOFSINGER J R. Behavioral finance: investors, corporations, and markets[M]. London: John Wiley & Sons, 2010.
- [26] Behavioral finance: investors, corporations, and markets [M]. London: Wiley, 2010.
- [27] KAZEMPOUR S J, CONEJO A J, RUIZ C. Strategic generation investment considering futures and spot markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1467-1476.
- [28] PARKINSON T. ASHRAE global database of thermal comfort field measurements[EB/OL]. [https:// dtadryad.org/stash/dataset/doi:10.6078/D1F671](https://dtadryad.org/stash/dataset/doi:10.6078/D1F671)

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2025-02-20

作者简介:

李恒杰(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力综合能源系统应急及用电能效管理; E-mail: lihj915@lut.edu.cn

刘依环(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为居民小区柔性负荷优化调度; E-mail: lyhduanbai@163.com

曾贤强(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源与微电网。E-mail: zengxqlut@163.com

(编辑 魏小丽)