

文章编号: 1006-2467(2024)01-0001-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.321

基于用户分类的综合能源系统低碳运行策略

张春雁¹, 窦真兰¹, 白冰青², 王玲玲², 蒋传文², 熊展²

(1. 国网上海综合能源服务有限公司, 上海 200023;

2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 综合能源系统 (IES) 是实现“双碳”目标的重要手段, 然而系统内部不同类型用户用能行为各异, 使得 IES 协调优化与低碳运行难度增加。为了充分发挥用户的主观能动性, 基于用户行为分析对 IES 的用户行为进行建模, 并通过卷积神经网络将用户分为激进型和保守型。构建 IES 运营商决策模型, 确定电热能源的供应方式, 针对不同类型用户设计相应的能源套餐。基于实际数据分析上述模型和方法的有效性, 验证了用户分类在 IES 低碳运行中的价值。

关键词: 用户分类; 用户行为; 综合能源系统; 低碳运行

中图分类号: TM732

文献标志码: A

Low-Carbon Operation Strategy of Integrated Energy System Based on User Classification

ZHANG Chunyan¹, DOU Zhenlan¹, BAI Bingqing², WANG Lingling²

JIANG Chuanwen², XIONG Zhan²

(1. State Grid Shanghai Integrated Energy Service Co., Ltd., Shanghai 200023, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Integrated energy system (IES) is an important means to achieve the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”. However, different types of users in the system have different energy consumption behaviors, which makes the coordinated optimization and low-carbon operation of the integrated energy system more difficult. In order to give full play to the subjective initiative of users, the user behavior of the integrated energy system is modelled based on user behavior analysis, and users are classified into aggressive and conservative types by convolutional neural network (CNN). Then, the decision model of integrated energy system operator is constructed to determine the supply mode of electric heating energy, and the corresponding energy package is designed for different types of users. Finally, the effectiveness of the above models and methods is analyzed based on actual data, and the value of user classification in low-carbon operation of integrated energy systems is verified.

Keywords: user classification; user behavior; integrated energy system (IES); low-carbon operation

收稿日期: 2022-08-19 修回日期: 2022-09-28 录用日期: 2022-10-27

基金项目: 上海市科技计划资助项目 (21DZ1208400)

作者简介: 张春雁 (1967-), 硕士, 从事电力与能源工程建设、安全生产、技术管理和科技创新等工作。

通信作者: 王玲玲, 博士, 助理研究员; E-mail: himalayart@163.com.

随着碳达峰、碳中和目标的提出,作为碳排放主要来源之一的电力行业正积极响应“双碳”目标,主动降低碳排放水平^[1-2]. 综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是实现“双碳”目标的重要支撑,可以提高能源利用效率,促进可再生能源消纳,从而降低用户用能过程中的碳排放水平^[3-4]. 而用户作为 IES 中的重要组成部分,其建模方式和行为规律是影响 IES 运行的重要方面^[5]. 在此背景下,从用户行为分析出发,研究 IES 低碳运行策略具有现实意义.

目前 IES 中对用户行为的研究主要集中于需求侧响应(Demand Response, DR)的建模上^[6]. 传统的 DR 包括价格型和激励型两种响应形式^[7-8]. IES 具有多能耦合的特点,可以进一步进行综合需求侧响应(Integrated DR, IDR),同步调节系统内的多元能源应对负荷调节需求. 文献[9]中将电负荷分为纯电负荷和电制热负荷来实现热电负荷的联合调度,但能源转换形式比较单一;文献[10]中基于综合需求响应和主从博弈构建 IES 调度模型,论证了博弈均衡解的存在,验证了 IDR 机制的价值;文献[11]中在 IES 的 IDR 建模中考虑了热网气网的管网动态特性,动态模型相比稳态模型反映工况更加准确;文献[12]中在 IDR 的基础上考虑了多主体间的博弈关系,通过联盟博弈实现用户间的制约平衡;文献[13]中基于演化博弈分析用户 DR 的行为,讨论用户用能行为可能造成的影响. 上述文献均利用 DR 体现用户用能可采取的行为,但对用户行为这一概念没有明确定义,用户在 IES 中处于被动接受的定位. 文献[14-15]中提出用户行为的建模,但和传统 DR 的模式表述一致,尚未对用户行为进行分类分析. 因此需要系统性地提出 IES 中用户行为的分析建模方法,作为 IES 用户研究的理论依据.

目前对 IES 低碳运行方面的研究,主要考虑碳交易机制和系统的碳排放水平. 文献[16-17]中在模型的目标函数中考虑 CO₂ 排放量,提出了含热电联产(Combined Heat and Power, CHP)机组的低碳经济调度方案. 文献[18]中在综合能源的调度模型中考虑碳排放目标约束,有效降低了碳排放水平. 文献[19]中在电能量和旋转备用市场的背景下,将阶梯式碳交易引入模型,分析电-热 IES 的低碳优化运行方案. 文献[20]中考虑高比例新能源,进行多能源园区低碳经济调度,提高能源利用率和调度灵活性. 文献[21]中运用生命周期分析折算 IES 的碳排放,利用碳市场交易机制促使 IES 主动降低碳排放水平. 尽管上述研究中对碳排放的计量和低碳运行策

略进行了一系列研究,但没有考虑用户行为在 IES 低碳运行中可能发挥的作用. 在碳达峰、碳中和背景下,有必要深入研究考虑用户行为的 IES 低碳运行策略.

基于以上分析,提出 IES 的用户行为建模方法,从主体、环境、手段、结果、客体 5 个维度构建 IES 用户行为的数据特征,输入卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)后实现用户类型分类. 分析 IES 参与碳交易和其他能源市场的机制,建立考虑碳交易和用户分类 IES 决策模型,通过多次迭代模拟 IES 的交易过程. 在算例中分析不同方案下 IES 收益的变化,验证基于用户分类运行策略的有效性.

1 IES 用户分类

1.1 用户行为模型

用户行为模型主要用于分析用户的用电活动规律和意愿,是电力系统的重要研究方向. IES 中用户的能源需求包括电、热、气等多种形式,能源间存在转化关系,用户行为模型更为复杂. 同时,IES 代表用户参与碳市场时需要考虑用户满意度. 因此,需要对用户行为进行建模分析,如图 1 所示.

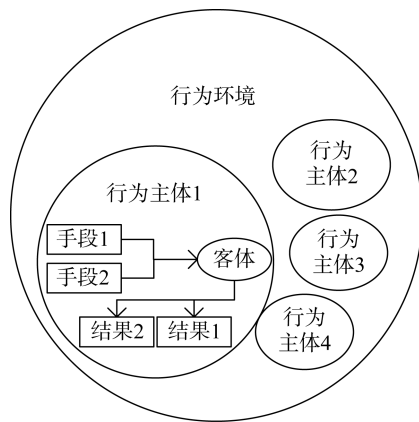


图 1 IES 用户行为模型

Fig. 1 User behavior model of IES

在社会学领域中,可以将人的行为分为主体、环境、手段、结果、客体 5 个部分^[22]. 在 IES 中,同样可以采用该方法分析能源用户. 行为主体指能源用户自身,包含其个人信息;行为环境指 IES 中的价格、气象、网络通畅情况等;行为手段指用户在能源系统运行过程中对自身用能的调整;行为结果指最终的能源需求和供给情况;行为客体指用能行为执行过程中受到操作的部分.

(1) 行为主体建模. IES 的用户主体可以使用一系列的用户属性表示,包括年龄、家庭成员、用能

习惯等信息,分别将其编码化计入数据库,如下式所示:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \in (0, 1, \dots, n_1) \\ B_2 \in (0, 1, \dots, n_2) \\ \vdots \\ B_i \in (0, 1, \dots, n_i) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{B} 为主体矩阵; B_i 为第 i 种用户属性,每种属性有 n_i 种情况,用 $(0, 1, \dots, n_i)$ 中的整数表示,其中 0 代表该属性未知。

(2) 行为环境建模. 对 IES 用户所处的环境建模,用户行为环境包括外部和内部环境,其中外部环境指用户的用能价格、能源供应方式等;内部环境包括用户自身具有的能源设备、经济水平、基础负荷曲线. 行为环境问题是系统运行的初始化条件,可以认为短时间内不会发生突变,环境矩阵表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{in}} = [e_{\text{in},1} \ e_{\text{in},2} \ \cdots \ e_{\text{in},i}] \\ \mathbf{E}_{\text{out}} = [e_{\text{out},1} \ e_{\text{out},2} \ \cdots \ e_{\text{out},i}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{E}_{in} 为内部环境,其中 $e_{\text{in},i}$ 为对应变量的取值; \mathbf{E}_{out} 为外部环境,其中 $e_{\text{out},i}$ 为对应变量的取值。

(3) 行为手段建模. 用户手段包含改变自身设备出力,通过改变储能、分布式能源的工作状态,修改自身的负荷需求,在系统能源价格变化时进行需求响应. 手段矩阵表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_a = [s_a^1 \ s_a^2 \ \cdots \ s_a^n] \\ \mathbf{s}_b = [s_b^1 \ s_b^2 \ \cdots \ s_b^n] \\ \vdots \\ \mathbf{s}_m = [s_m^1 \ s_m^2 \ \cdots \ s_m^n] \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{S} 中包含 m 个手段 s_m ,每一手段包含 n 个可选状态 $[s_m^1 \ s_m^2 \ \cdots \ s_m^n]$. 手段矩阵在系统运行过程中多次迭代以确定最终状态。

(4) 行为结果建模. 行为结果包含用户的用能成本和用能体验. 对用户而言,决定自身用能方案和完成用能体验不同步. 一般而言,用户先完成用能决策,用能完成后获得全部体验,从而得到满意度. 结果矩阵表示为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 = A_1^1 X + A_1^2 Y_1 \\ D_2 = A_2^1 X + A_2^2 Y_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: D_1 为用户的用能成本函数; D_2 为用户的用能体验函数. D_1 和 D_2 共用部分影响变量 X ,但影响程度 A_1^1 和 A_2^1 不同;同时存在不同的影响变量 Y_1 和 Y_2 。

(5) 行为客体建模. 包括用户负荷和设备的数学建模,负荷模型包括用户自调节负荷和系统调节负荷模型;设备模型包括用户自身具有的分布式光伏储能等设备。

1.2 基于 CNN 的用户类型分类

不同类型的用户对用能感知不同,需要对用户进行分类从而设计合适的能源套餐. 考虑用户信息种类繁多,常规聚类方法难以发挥全部信息的作用,因此基于 CNN 进行用户分类从而区分用户的交易意愿和风险偏好。

1.2.1 神经网络建模 CNN 设计的参数如表 1 所示,其中“空白”表示无该数据. 输入信息包括 IES 用户信息,即用户行为模型中主体矩阵、环境矩阵和手段矩阵,其中涉及个人信息的方面主要通过问卷获取. 输出信息为不同用户类型的概率。

表 1 CNN 参数
Tab. 1 Parameters of CNN

层	输入	输出	超参数
卷积层	233×1	233×64	ReLU
卷积层	233×64	233×64	ReLU
最大池化层	77×64	77×64	3
Dropout 层	64	64	0.2
全连接层	77×64	77×64	ReLU
全连接层	77×64	77×32	ReLU
平均池化层	77×32	32	
Dropout 层	32	32	0.5
Softmax 输出层	32	2	

输入信息需要对原始数据进行处理,包括数据清洗和编码化. 数据来自爱尔兰电力智能计量技术试验^[22],以问卷形式的信息为主,包含用户的性别、家庭、收入等基础信息,家用设备的种类和数量等设备信息,用能态度和用能习惯等生活信息. 问卷信息中存在问题未回答的现象,将这一类缺失数据统一设定为-1,其他已回答的问题,根据答案编号进行编码,主要分为以下 5 种情况:①对于“是”和“否”类型等二元答案分别按照 2 和 1 编码,拒绝回答按照 0 编码;②对于存在多个选项的答案分别按照 $1-n'$ 编码,拒绝回答按照 0 编码;③对于数量类的答案按照实际数量编码,拒绝回答按照 0 编码;④对于态度类型的答案按照强烈同意、一般同意、中立、一般反对、强烈反对从 1~5 编码,拒绝回答按照 0 编码;⑤对于文字类回答不进行编码,不输入神经网络。

1.2.2 用户特征区分 传统 DR 形式从综合能源商的需求角度分为价格型和激励型,通过不同响应形式实现综合能源商对用户的影响. 从用户行为角度出发,将用户分为保守型和激进型,用户特征如下。

(1) 保守型用户(A). 保守型用户行为主体参与市场意愿低,对电价敏感度不高,调节自身负荷意

愿低,为其提供的套餐峰谷价差小,每一时段的价格波动也更低,受环境影响负荷变化小。

可采用的手段为用户根据电价变化主动进行电负荷 $e_t^{A, \text{var}}$ 调节和运营商根据系统运行状态进行供热量 $h_t^{A, \text{adj}}$ 调整(下标 t 为时间),手段矩阵表示为

$$\mathbf{S}_t^A = \begin{bmatrix} h_t^{A, \text{adj}} \in [h_t^{A, \text{amin}}, h_t^{A, \text{amax}}] \\ e_t^{A, \text{var}} \in [e_t^{A, \text{vmin}}, e_t^{A, \text{vmax}}] \end{bmatrix} \quad (5)$$

行为结果包括保守型用户的用能成本和满意度:

$$D_{C,t}^A = \sum_t (a_1^A e_t^A + a_2^A h_t^A - p_{e,t}^A e_t^A - p_{h,t}^A h_t^A) \quad (6)$$

$$D_{S,t}^A = 1 - \frac{b_1}{c_{a,e}} \sum_t p_{e,t}^A e_t^A - \frac{b_2}{c_{a,h}} \sum_t p_{h,t}^A h_t^A + \frac{b_3}{l_{a,e}} \sum_t e_t^A \quad (7)$$

式中: a 和 b 均为权重参数, a 代表用户用能的边际效用, b 代表用户对该项的重视程度,取值范围为 $(0, 1)$; e_t^A 和 h_t^A 分别为保守型用户在 t 时的电热负荷; e 和 h 分别表示电和热负荷; p 为价格; c_a 为参考用能成本选择用能套餐中中等水平套餐的成本; $l_{a,e}$ 为初始用电量,取用户调节前的负荷; $D_{C,t}^A$ 为用户进行用能决策的目标函数,由用户效用和用户用能成本的差值构成; $D_{S,t}^A$ 为系统运行过程中需要达成的指标,初始值为 1,用能成本越低、用电量越高,则满意度越高。

(2) 激进型用户(C). 激进型用户参与市场意愿比较强烈,部分用户配置了分布式发电设备,以分布式光伏为主,配合少量储能. 该类行为主体在市场中交易行为较多,对价格敏感度高,调节自身负荷的意愿高,为其提供的套餐峰谷价差大,每一时段的价格波动也更大。

行为手段包括调整分布式光伏的使用比例、改变储能工况和进行负荷调节. 手段矩阵包括用户用电调节量 $e_t^{C, \text{var}}$ 、用热调节量 $h_t^{C, \text{adj}}$ 、用户自身储能充电功率 $s_t^{C, \text{u}}$ 、放电功率 $s_t^{C, \text{d}}$ 和分布式光伏消纳量 $e_t^{C, \text{pv}}$, 表示为

$$\mathbf{S}_t^C = \begin{bmatrix} e_t^{C, \text{var}} \in [-e_t^{C, \text{vmax}}, e_t^{C, \text{vmax}}] \\ h_t^{C, \text{adj}} \in [-h_t^{C, \text{amax}}, h_t^{C, \text{amax}}] \\ s_t^{C, \text{u}} \in [0, s_t^{C, \text{umax}}] \\ s_t^{C, \text{d}} \in [0, s_t^{C, \text{dmax}}] \\ e_t^{C, \text{pv}} \in [0, e_t^{C, \text{pvmax}}] \end{bmatrix} \quad (8)$$

行为结果包括激进型用户的用能成本和满意度:

$$D_C^C = \sum_t a_1^C e_t^C + a_2^C h_t^C - p_{e,t}^C e_t^C - p_{h,t}^C h_t^C \quad (9)$$

$$D_{S,t}^C = 1 - \frac{b_1}{c_{a,e}} \sum_t p_{e,t}^C e_t^C - \frac{b_2}{c_{a,h}} \sum_t p_{h,t}^C h_t^C + \frac{b_3}{l_{a,e}} \sum_t e_t^C \quad (10)$$

D_C^C 为用户进行用能决策的目标函数,碳排放为系统运行过程中需要达成的指标。

2 IES 建模

2.1 IES 结构

IES 结构如图 2 所示. 运营商从外部购入电力和天然气,参与碳市场交易,对内和用户签订供能协议,为用户提供多种能源. 在 IES 中,外网的电、气经过传输端口进入系统,共同构成输入能源集合. 系统通过风力发电、光伏提供清洁电能,通过 CHP 机组热电联供,通过燃气锅炉和电锅炉产热。

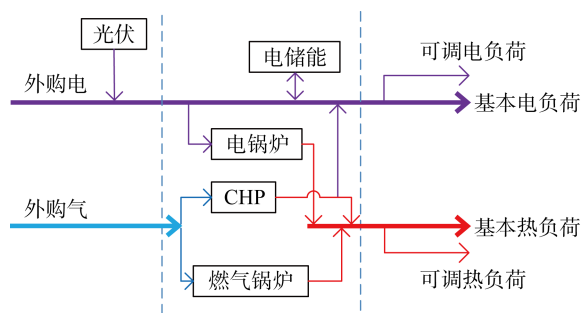


图 2 IES 结构

Fig. 2 Structure of IES

随着“双碳”目标的逐步推进,IES 在未来会参与碳市场交易. 参考目前碳市场交易规则^[23],根据 IES 因自身的电热负荷水平获得一定的初始碳配额,外购电和系统燃气机组运行中产生的碳排放会消耗碳额度,额度不足时需向碳市场购买,额度充足时剩余额度可以参与碳市场交易获得收益。

2.2 IES 运营商运行模型

2.2.1 目标函数 IES 运营商优化目标为经济效益最高,目标函数 f 包括系统供能成本 C_1 ,弃光成本 C_2 和参与碳市场的碳交易成本 C_3 , R 为售能收益,表示为

$$\left. \begin{aligned} f &= \min(C_1 + C_2 + C_3 - R) \\ C_1 &= \sum_{i,t} C_{\text{gas},i,t} Q_{\text{gas},i,t} + \sum_t C_{\text{buy},t} P_{\text{buy},t} \\ C_2 &= \sum_t \lambda_{t,\text{pv}} P_{t,\text{pv},\text{ab}} + \sum_t \lambda_{t,\text{se}} S_{t,\text{se}} \\ C_3 &= \sum_t (E_{\text{CO}_2,t} - E_{\text{CO}_2,t}^{\text{in}}) \lambda_{\text{CO}_2,t} \\ R &= \sum_{j,t} p_{e,t}^j L_{e,t}^j + \sum_{j,t} p_{h,t}^j L_{h,t}^j \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: C_1 包括系统购气成本和购电成本; $C_{\text{gas},i,t}$ 为第

i 个机组在 t 时刻的购气单价; $Q_{\text{gas},i,t}$ 为购气量; $C_{\text{buy},t}$ 为系统外购电价格; $P_{\text{buy},t}$ 为系统购电量; $P_{t,\text{pv},\text{ab}}$ 为弃光量; $\lambda_{t,\text{pv}}$ 为弃光补偿价格; $S_{t,\text{se}}$ 为储能使用量; $\lambda_{t,\text{se}}$ 为储能的单位成本; $E_{\text{CO}_2,t}$ 为系统的碳排放水平,根据系统外购电和燃气机组用气计算; $E_{\text{CO}_2,t}^{\text{in}}$ 为系统初始分配的碳额度,假定未来参与碳市场后根据系统负荷折算,为固定值; $\lambda_{\text{CO}_2,t}$ 为市场碳价; $p_{e,t}^j$ 为 t 时刻 j 用户用电价格; $L_{e,t}^j$ 为 t 时刻 j 用户电负荷需求; $p_{h,t}^j$ 为 t 时刻 j 用户用热价格; $L_{h,t}^j$ 为 t 时刻 j 用户热负荷需求。

2.2.2 约束条件

(1) 电力约束,包括电功率平衡约束和机组出力约束:

$$\left. \begin{aligned} e_{\text{chp},t} + e_{\text{pv},t} + e_{\text{es}} + e_{\text{buy}} &= e_t^{\text{A}} + e_t^{\text{C}} + e_{\text{eb}} \\ e_{G,i}^{\min} &\leq e_{G,i} \leq e_{G,i}^{\max} \\ e_{\text{d}} &\leq e_{G,i} - e_{G,i-1} \leq e_{\text{u}} \\ 0 &\leq e_{\text{buy}} \leq e_{\text{buy}}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: $e_{\text{chp},t}$ 为 CHP 机组发电量; $e_{\text{pv},t}$ 为系统光伏消纳量; e_{es} 为储能功率; e_{buy} 为外购电; e_{eb} 为电锅炉耗电; $e_{G,i}$ 为第 i 个设备的出力; $e_{G,i}^{\max}$ 和 $e_{G,i}^{\min}$ 为出力上下限; e_{u} 和 e_{d} 为爬坡上下限。

(2) 热力约束,包括热功率平衡约束和机组产热约束:

$$\left. \begin{aligned} h_{\text{chp},t} + h_{\text{gb},t} + h_{\text{eb}} &= h_t^{\text{A}} + h_t^{\text{C}} \\ h_{G,i}^{\min} &\leq h_{G,i} \leq h_{G,i}^{\max} \\ h_{\text{d}} &\leq h_{G,i} - h_{G,i-1} \leq h_{\text{u}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $h_{\text{chp},t}$ 为 CHP 机组产热; $h_{\text{gb},t}$ 为燃气锅炉产热; h_{eb} 为电锅炉产热; $h_{G,i}$ 为所有机组产热量,上限为 $h_{G,i}^{\max}$,下限为 $h_{G,i}^{\min}$; h_{u} 和 h_{d} 为爬坡上下限。

(3) 用户相关约束:

$$\left. \begin{aligned} D_{S,t}^{\text{A}(\text{C})} &\geq D_{S,t}^{\text{A}(\text{C}),\min} \\ p_{e,t}^{\text{A}(\text{C}),\min} &\leq p_{e,t}^{\text{A}(\text{C})} \leq p_{e,t}^{\text{A}(\text{C}),\max} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

用户满意度需大于最低满意度 $D_{S,t}^{\text{A}(\text{C})}$,用户购能价格 $p_{e,t}^{\text{A}(\text{C})}$ 存在上下限 $p_{e,t}^{\text{A}(\text{C}),\min}$ 和 $p_{e,t}^{\text{A}(\text{C}),\max}$ 。

2.3 IES 运营商的交易策略

2.3.1 用户套餐制订 运营商依据用户分类结果为不同的 IES 用户设计供能套餐,不同套餐的供热价格相同,保证用户基础热需求,并允许实际供热量 10% 以内的波动。供电套餐如表 2 所示,其中 23:00—8:00 为谷时,17:00—20:00 为峰时,剩余时段为平时。针对保守型用户,考虑其用能情况不受价格波动影响,为其提供峰谷价差小的能源套餐;针对激进型用户,考虑其在应对价格波动时积极响应,会主动调节用量,为其提供峰谷价差大的能源套餐。考

虑 IES 中存在新接入的用户或拒绝提供个人信息用户,无法进行用户分类,因此为其提供介于保守和激进之间的过渡型套餐。套餐中每时段的价格存在波动,用户负荷会相应变化。

表 2 能源套餐

Tab. 2 Package for power supply

用户类型	元/(kW · h)		
	谷时电价	峰时电价	平时电价
保守型	0.60 ± 0.05	1.00 ± 0.05	0.70 ± 0.05
过渡型	0.55 ± 0.08	1.45 ± 0.08	0.65 ± 0.08
激进型	0.50 ± 0.10	1.90 ± 0.10	0.60 ± 0.10

2.3.2 交易流程 IES 交易流程如图 3 所示,运营商通过问卷和智能仪表收集用户信息,输入神经网络初步判断用户类型,为用户提供能源套餐推荐;待用户选择后,综合能源运营商根据套餐执行供能方案,同时考虑基于 CNN 的用户分类方法存在误差,运营商在系统的实际运行中可根据运行结果修订用户信息和分类,修改能源套餐推荐,提高用户和综合能源运营商的收益。

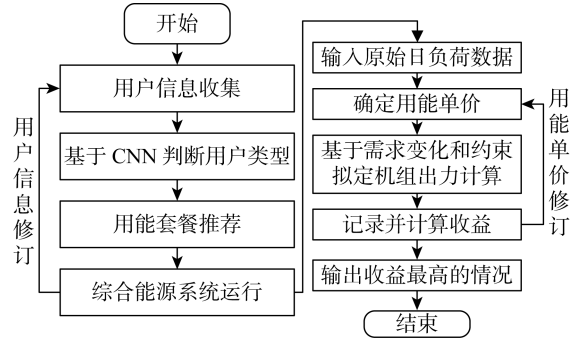


图 3 交易流程

Fig. 3 Transaction process

每日的运行中首先输入原始日负荷数据,根据用户套餐的价格区间选择用能单价,考虑用户的负荷需求变化和机组约束计算收益,多次修订价格后选择收益最高的方法运行。

2.3.3 迭代求解 IES 的交易分为两个迭代过程。一种是在每日运行中的迭代,需要多次计算用能单价,并更新价格变化对负荷水平的影响,确定日运行方案;另一种一般以月度为单位更换用户信息,为用户提供新的用能套餐,确定价格区间。

3 算例分析

3.1 算例基本参数设置

为验证考虑用户分类的 IES 低碳运行方法的有效性,设计如下算例:用户数据采用文献[24]中提

供的问卷信息和负荷曲线,分为保守型和激进型两种,如图 4 所示. 部分激进型用户设有分布式光伏和储能,光伏自发自用,余量不上网,用户储能容量为系统储能的 1/10. IES 设备参数参考文献[25],并根据用户负荷水平修改设备配置,得到本文电热气 IES 的相关参数,如表 3 所示.

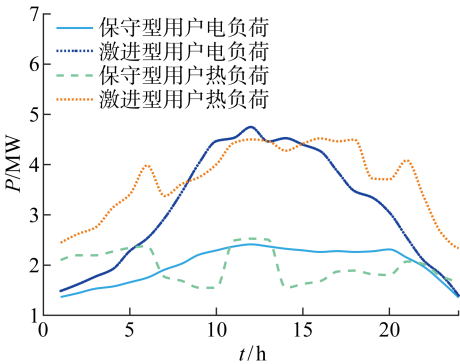


图 4 用户初始负荷 (P)
Fig. 4 Initial load of user (P)

表 3 系统参数
Tab. 3 Parameter of system

参数	取值	参数	取值
CHP 机组容量/MW	2	电锅炉容量/MW	0.5
爬坡功率/(MW · h ⁻¹)	1	转热效率	0.8
产电效率	0.3	燃气锅炉容量/MW	0.5
产热效率	1.2	产热效率	0.9
储能容量/(MW · h)	5	外购电碳排放比例	0.824 4
充电效率	0.95	燃气碳排放比例	0.570 4
放电效率	0.95	天然气价格/(元 · m ⁻³)	2
最大充放电功率/MW	0.5	碳交易价格/(元 · t ⁻¹)	200
外购电容量/MW	3	热价/[元 · (kW · h) ⁻¹]	0.1

3.2 用户分类精度分析

IES 的用户分类基于 1.2 节中设计的 CNN 进行. 数据来自爱尔兰电力智能计量技术试验,共 4 232 组实验前问卷和 3 423 组实验后问卷. 数据处理后统计实验前后一致且有效回答的用户共 2 446 户. 根据用户在实验后用电量的变化情况,将其分为保守型和激进型用户. 选用其中 2 000 组作为训练集,446 组作为测试集,迭代 200 次进行训练.

由图中可以看出,用户分类的精度可达到 0.825. 神经网络在迭代 100 次前处于 0.600 ~ 0.700 的精度,观察数据集后发现,此时输出的用户分类结果均为同一用户,因此该精度没有意义. 迭代 150 次后神经网络基本收敛,此时可以实现大部分用户分类.

如果不使用 CNN 的方法进行分类,交由用户自身判断,通过对比用户在实验前后的问卷信息,选择在实验前后用户判断自身用电变化的一栏,则用户判断成功率为 0.523 6. 通过分析数据集可以发现,多数用户在实验开始前认为自己是激进型用户,可以根据电价调整自身用电量,但实验后激进型用户的比例并没有预期高,因此交由用户自身判断适合的套餐精度具有局限性,而使用本文方法能够提升系统用户分类的精度,服务系统运行.

3.3 用户分类的影响分析

方案 1 系统运营初期,用户信息不充分,用户偏好不确定,用户全部选择过渡型.

方案 2 用户分类错误,用户偏好不符合能源套餐.

方案 3 用户分类正确,用户偏好符合能源套餐.

其中,保守型、过渡型、激进型用户分别简称为 A、B、C 类用户.

3.3.1 经济性分析

(1) 成本收益分析. IES 在 3 种模式下的成本收益如表 4 所示. 运营商在方案 1 中所获收益最高,这是因为此时用户对自身信息不完全了解,用户选择过渡型套餐后,系统运营商可以借助用户的认知缺陷获得超额收益,导致用户的能源成本较高. 方案 2 中用户所选套餐同自身偏好相反,导致用户用能成本急剧上升,用户付出了更多成本,IES 运营商的收益没有上升,是一种双输的局面,说明用户正确分类对运营商和用户都十分重要. 方案 3 中,用户的用能成本最低,说明在正确进行用户分类后,通过让用户选择正确的套餐可以有效降低用户用能,提高用能体验. 而对于运营商而言,方案 3 所获收益相比用户分类错误的方案 2 更高,说明正确的分类对运营商和用户都有益处. 同时方案 3 相比过渡态的方

表 4 3 种方案的成本收益参数
Tab. 4 Parameters of cost in three plans

名称	数值/万元		
	方案 1	方案 2	方案 3
外购电成本	1.747	2.022	1.498
外购气成本	2.937	2.937	2.937
碳交易成本	0.510	0.593	0.439
用户购电成本	7.680	7.943	7.274
用户购热成本	1.358	1.358	1.358
运营商总收益	3.843	3.749	3.758

案 1 收益下降了 2%,下降程度比较低,属于提高用户体验可接受的代价,且方案 1 的超额收益来自系统初期的过渡阶段,是不可持续的收益,过渡到方案 3 符合 IES 的发展规律.

(2) 价格迭代分析.以过渡型为例,修订价格前

后的能源套餐对比如表 5 所示.可以看到通过价格修订,运营商收益明显上升,用户购电成本反而略微下降,这是因为通过价格的调整使得用户主动调整其用电曲线,总用电量下降,最终通过能源套餐的变化使运营商和用户获得双赢.

表 5 能源套餐变化
Tab. 5 Changes of power supply package

变化状态	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]			运营商收益/万元	用户购电成本/万元	用户购电量/(MW·h ⁻¹)
	谷时	峰时	平时			
修订前	0.55	1.45	0.65	3.088	7.776	106.3
修订后	0.63	1.53	0.73	3.843	7.679	94.6

3.3.2 系统工况分析 图 5 为系统在方案 1、2、3 下各设备的运行结果.由图可知,3 种方案下 IES 运行策略基本一致,系统内光伏得到全额消纳,CHP 机组基本满发,全程保持额定功率发热发电.燃气锅炉作为供热的补充手段,在 3 个供热高峰期工作,储能主要根据外购电的价格波动削峰填谷,同时配合消纳多余的光伏发电.

3 种方案的不同之处在于外购电的水平不同.在方案 1 下,因为用户选择了过渡型,实际负荷水平处于中间态,外购电曲线比较低,系统成本相对可控,所获收益也最高.在方案 2 下,用户偏好选择判

断错误,导致套餐同用户适配性很差,用户实际负荷水平高,导致外购电量很多,用户成本和系统成本上升,整体收益下降.在方案 3 下,得益于用户的正确分类,用户实际用电量最低,IES 在满足用户用能需求的同时,也有效降低了用能成本,从而提高系统收益,是运营商合理的运营策略.

3.3.3 用户工况分析 系统热负荷供应在 3 种套餐相同,以满足用户热负荷基础需求为准,允许上下限浮动,因此主要关注套餐中不同的电负荷.

3 种方案的用户电负荷水平如图 6 所示,其中方案 1 和 3 的负荷水平区别不大,说明用户选择中

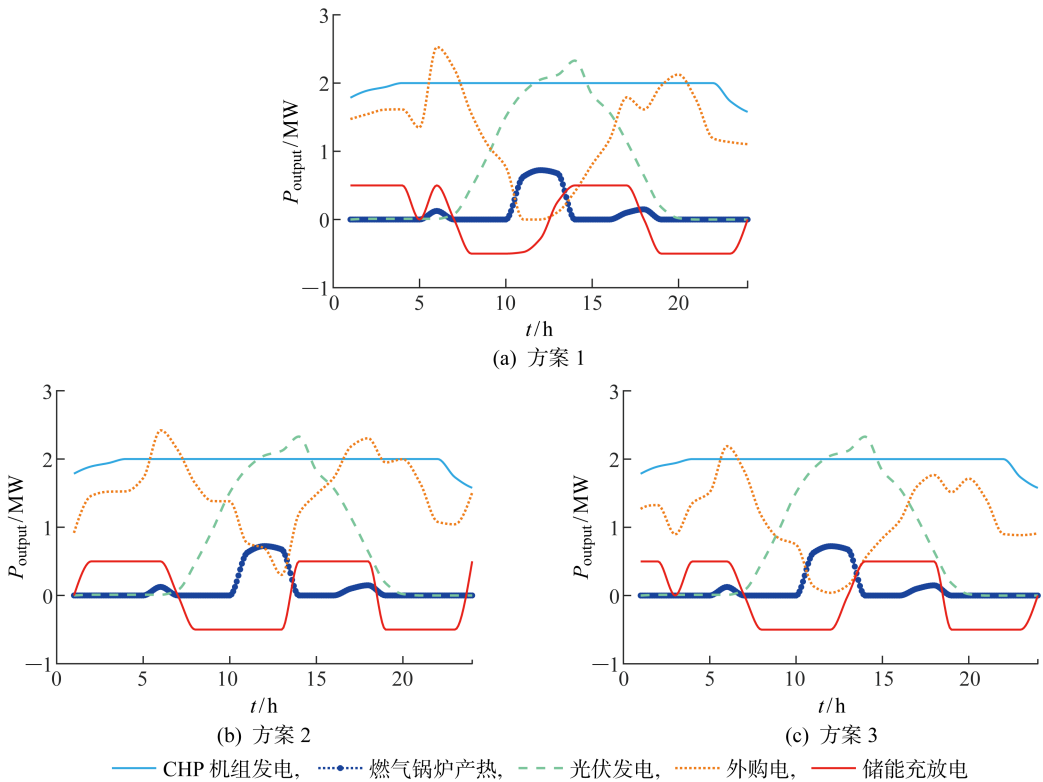


图 5 系统设备出力 (P_{output})
Fig. 5 Output of system equipment (P_{output})

间的过渡型套餐和适配自身的套餐对负荷影响较小,主要影响用能成本.可以看出,在 17:00—20:00 的电价峰值区,方案 3 的用电量明显低于方案 1,说明适合用户的能源套餐有助于负荷曲线优化,从而提高用户体验和运营商收益.而方案 2 因为对用户类型判断错误,导致负荷变化较大,用户体验和运营商收益都有所下降,说明用户分类需要足够的准确度,否则会对 IES 运营策略的制定产生不利影响.

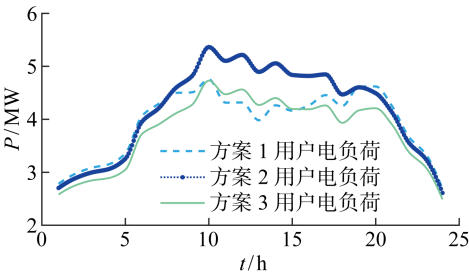


图 6 用户电负荷
Fig. 6 Electrical load of user

用户的储能和光伏工作情况如图 7 所示. 用户光伏实现全额消纳,用户储能在 15:00—20:00 电价高的时间段内以释放电能为主,在其他电价低的时间段内以存储电能为主,同时帮助修正用户负荷曲线,起到了削峰填谷的作用.

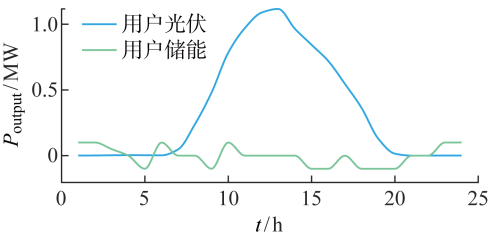


图 7 用户设备使用情况
Fig. 7 Usage of user equipment

用户满意度水平如表 6 所示,其中用电总量的参考值取用户初始负荷,用电成本和用热成本的参考值参考过渡型用户数值,式(7)和(10)中的 b_1 、 b_2 、

表 6 满意度参数

Tab. 6 Parameters of satisfaction

方案	用电总量/ MW	用电成本/ 万元	用热成本/ 万元	满意度
方案 1	94.64	7.680	1.358	0.188 0
方案 2	99.71	7.943	1.358	0.186 3
方案 3	90.38	7.274	1.358	0.208 2
参考值	123.03	7.943	1.358	

注:“空白”表示无此值.

b_3 分别取 0.8、0.5 和 0.6.可以看出方案 2 中用户的用能满意度最低,说明错误的用户分类会降低用户体验.方案 1 的满意度也低于方案 3,虽然方案 1 运营商可获利润更高,但考虑方案 1 状态的不可持续和利润差距仅为 2%,提高用户满意度的方案 3 更符合长久运营观念.方案 3 中,运营商可获得较高收益,用户也有最高的满意度,实现了用户和运营商的双赢.

3.3.4 低碳运行分析 3 种方案中,方案 3 的碳交易成本即碳排放水平最低.这是因为 IES 中碳排放的主要来源为燃气机组和外购电,3 种方案的燃气机组水平基本相同,方案 3 因为对用户的用电情况掌握最好,通过正确的用户分类,有效降低了用户的用电量,提高用电效率,从而降低了综合能源系的碳排放水平,符合当前的发展趋势.

3.4 套餐修订的影响

IES 在系统运行初期,对用户信息掌握不完全,存在部分用户拒绝提供个人信息或者提供信息有误的情况,此时推荐此类用户选择过渡型套餐;当系统经过一段时间运行后,获得了足够信息,可为用户提供新一轮的套餐选择.因此,可分为以下两个阶段:

阶段 1 系统运行初期,假设其中 50% 用户选择过渡型套餐,50% 用户提供个人信息后,参与综合能源运营商的用户分类,根据 3.2 中的计算结果,分类准确率为 82.5%,该类用户根据综合能源运营商推荐选择用能方案.

阶段 2 经过月度运行后,综合能源运营商获得所有用户的信息,根据用户信息再次进行用户分类,为用户提供新的能源套餐,分类准确率同样取 82.5%.

不同阶段的运行结果如表 7 所示.可知,经过阶段 1 到阶段 2 的转变,运营商收益基本不变,用户购能成本和系统碳交易成本明显下降.由此说明综合能源运营商可以通过对用户信息的数据挖掘,为用户提供更精确的套餐,从而提高收益.

表 7 两个阶段的成本收益参数

Tab. 7 Parameters of cost and benefit at two stages

名称	收益/万元	
	阶段 1	阶段 2
外购电成本	1.652	1.402
外购气成本	2.937	2.937
碳交易成本	0.482	0.407
用户购电成本	7.462	7.129

4 结论

基于用户行为分析,提出 IES 的用户分类方法,并在碳交易的背景下建立考虑用户分类的 IES 决策模型,研究 IES 的运行策略,得出以下结论:

(1) 用户行为模型和 CNN 可以构成高精度的用户分类技术. 通过对用户行为进行分析,总结包含用户行为特征的数据结构,输入 CNN 训练后可以得到高精度的 IES 用户分类.

(2) 用户分类是 IES 运行中的重要环节. 用户对自身用能偏好的认知存在缺陷,需要运营商通过精准的用户分类,为用户提供合适的能源套餐,从而有效降低用户用能成本,提高 IES 的经济效益.

(3) IES 的碳排放主要来自外购电和燃气机组,参与碳市场后,为控制碳交易成本,需要尽可能消纳可再生能源,减少系统用电量,从而在保护环境的同时提高系统收益.

参考文献:

[1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] 黄强,郭怿,江建华,等. “双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1499-1509.
HUANG Qiang, GUO Yi, JIANG Jianhua, *et al.* Development pathway of China's clean electricity under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(12): 1499-1509.

[3] 卫志农,张思德,孙国强,等. 基于碳交易机制的电气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, *et al.* Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(15): 9-16.

[4] 刘哲远,邢海军,程浩忠,等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 169-178.
LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, *et*

al. Bi-level optimal scheduling of comprehensive energy system considering carbon emission flow and demand response[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 169-178.

[5] 王舒萍,张沈习,程浩忠,等. 计及用户热舒适度的综合能源系统可靠性指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 86-95.
WANG Shuping, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, *et al.* Reliability indices and evaluation method of integrated energy system considering thermal comfort level of customers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(1): 86-95.

[6] 曾鸣,武赓,李冉,等. 能源互联网中综合需求侧响应的关键问题及展望[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3391-3398.
ZENG Ming, WU Geng, LI Ran, *et al.* Key issues and prospects of integrated demand side response in energy Internet[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(11): 3391-3398.

[7] 张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, *et al.* Summary of research on demand response in electricity market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(3): 97-106.

[8] KIRSCHEN D S. Demand-side view of electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 520-527.

[9] SHAO C Z, DING Y, WANG J H, *et al.* Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 361-370.

[10] 赵海彭,苗世洪,李超,等. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 573-588.
ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, *et al.* Study on optimal operation strategy of comprehensive energy system in park considering coupling response characteristics of cooling, heating and power demand [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2): 573-588.

[11] 徐箭,胡佳,廖思阳,等. 考虑网络动态特性与综合需求响应的综合能源系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 40-48.
XU Jian, HU Jia, LIAO Siyang, *et al.* Coordinated optimization of integrated energy system considering network dynamic characteristics and integrated demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(12): 40-48.

- [12] 徐业琰, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于综合需求响应和博弈的区域综合能源系统多主体日内联合优化调度[J]. **电网技术**, 2019, 43(7): 2506-2518.
XU Yeyan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, *et al.* Multi-player intraday optimal dispatch of integrated energy system based on integrated demand response and games[J]. **Power System Technology**, 2019, 43(7): 2506-2518.
- [13] 窦迅, 王俊, 王湘艳, 等. 基于演化博弈的区域电-气互联综合能源系统用户需求侧响应行为分析[J]. **中国电机工程学报**, 2020, 40(12): 3775-3786.
DOU Xun, WANG Jun, WANG Xiangyan, *et al.* Analysis of user demand side response behavior of regional integrated power and gas energy systems based on evolutionary game[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(12): 3775-3785.
- [14] 田丰, 贾燕冰, 任海泉, 等. 计及用户行为及满意度的电-气综合能源系统优化调度[J]. **电测与仪表**, 2021, 58(5): 31-38.
TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, *et al.* Optimal dispatch of electricity-gas integrated energy system considering user behavior and satisfaction[J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**, 2021, 58(5): 31-38.
- [15] 王琪鑫, 刘涤尘, 吴军, 等. 计及用户行为分析的多能协同综合能源系统供需双侧综合优化[J]. **电力自动化设备**, 2017, 37(6): 179-185.
WANG Qixin, LIU Dichen, WU Jun, *et al.* Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand sides of IES-MEC[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2017, 37(6): 179-185.
- [16] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R, ROOSTA A, *et al.* A new multi-objective reserve constrained combined heat and power dynamic economic emission dispatch[J]. **Energy**, 2012, 42(1): 530-545.
- [17] FUMO N, MAGO P J, CHAMRA L M. Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems[J]. **Applied Energy**, 2009, 86(11): 2344-2350.
- [18] 丁雨昊, 吕干云, 刘永卫, 等. 考虑碳排放目标约束和需求侧响应的综合能源系统日前优化调度[J]. **南方电网技术**, 2022, 16(8): 1-11.
DING Yuhao, LÜ Ganyun, LIU Yongwei, *et al.* Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission target constraints and demand side response[J]. **Southern Power System Technology**, 2022, 16(8): 1-11.
- [19] 江婷, 邓晖, 陆承宇, 等. 电能量和旋转备用市场下电-热综合能源系统低碳优化运行[J]. **上海交通大学学报**, 2021, 55(12): 1650-1662.
JIANG Ting, DENG Hui, LU Chengyu, *et al.* Low-carbon optimal operation of an integrated electricity-heat energy system in electric energy and spinning reserve market[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(12): 1650-1662.
- [20] 吕祥梅, 刘天琪, 刘绚, 等. 考虑高比例新能源消纳的多能源园区日前低碳经济调度[J]. **上海交通大学学报**, 2021, 55(12): 1586-1597.
LÜ Xiangmei, LIU Tianqi, LIU Xuan, *et al.* Low-carbon economic dispatch of multi-energy park considering high proportion of renewable energy[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(12): 1586-1597.
- [21] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. **中国电机工程学报**, 2019, 39(6): 1614-1626.
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, *et al.* Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2019, 39(6): 1614-1626.
- [22] 理查德·格里格, 菲利普·津巴多. 心理学与生活[M]. 第17版. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
GERRIG Richard J, ZIMBARDO Philip G. *Psychology and life*[M]. 17th ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2005.
- [23] 李幸芝, 韩蓓, 李国杰, 等. 分布式绿色能源碳交易机制及碳数据管理的挑战[J]. **上海交通大学学报**, 2022, 56(8): 977-993.
LI Xingzhi, HAN Bei, LI Guojie, *et al.* Challenges of distributed green energy carbon trading mechanism and carbon data management[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(8): 977-993.
- [24] Commission for Energy Regulation. CER smart metering project-electricity customer behavior trial, 1st edition [DB/OL]. (2009-12-31) [2022-08-08]. <https://www.ucd.ie/issda/data/commissionforenergyregulationcer/>.
- [25] LI R, WEI W, MEI S W, *et al.* Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: An MPEC approach[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2019, 10(4): 3641-3653.

(本文编辑:孙伟)