

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200511

基于演化博弈的用户综合用能行为决策方法研究

黄悦华, 王艺洁, 杨楠, 刘毅, 郭思涵, 湛桥, 史振利

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着综合能源市场中人们的能源消费形式日趋多样化, 如何根据用户用能需求的变化特征分析用户群体的综合用能行为决策是目前亟需解决的重要问题。针对该问题, 提出了一种基于演化博弈的用户综合用能行为决策方法。首先, 考虑居民、大工业以及商业用户在内的三类用户, 基于主客观组合赋权法构建了一种计及用户用能特性和用户舒适度因素的效用模型。在此基础上, 基于演化博弈方法提出用以描述用户用能选择动态过程的博弈模型。最后, 利用分布式迭代求解方法对模型进行求解。基于仿真算例的结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 演化博弈; 用户综合用能行为决策; 主客观组合赋权法; 效用模型; 演化均衡

Research on a decision method of a user comprehensive energy use behavior based on an evolutionary game

HUANG Yuehua, WANG Yijie, YANG Nan, LIU Yi, GUO Sihan, CHEN Qiao, SHI Zhenli

(College of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: With the increasing diversification of human energy use forms in the integrated energy market, how to analyze the decision of comprehensive energy use behavior for different user groups according to the changing characteristics of their energy demand is an important issue. To solve this problem, a decision method of a user's comprehensive energy use behavior based on an evolutionary game is proposed. First, considering three types of users that include residents, large industry, and business users, a utility model which takes into account energy use characteristics of users and user comfort factors is constructed based on a subjective and objective combination weighting method. Then, a game model is proposed to describe the dynamic process of user energy selection based on the evolutionary game method. Finally, the model is solved by a distributed iterative method. The correctness and validity of the proposed method are verified by the simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607104).

Key words: evolutionary game; decision of user's comprehensive energy use behavior; subjective and objective combination weighting method; utility model; evolutionary equilibrium

0 引言

随着能源危机的日益加深, 能够打破异质能源壁垒, 提升能源综合利用效率的综合能源系统^[1-3]近年来得到快速发展。随着综合能源市场化进程的逐步推进, 人们在能源消费过程中, 可供其选择的能源形式日趋多样化^[4-5], 如天然气、电能、燃煤等。而在较长的时间尺度下, 人们的用能负荷有可能会在不同形式的能源之间发生转移。因此, 对于综合能源系统而言, 不同形式的异质能源^[6-7], 会以人的用能行为为纽带, 在用户侧形成新的耦合节点。在

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607104)

上述背景下, 研究用户对不同形式能源的选择决策行为对未来综合能源系统的规划与运行具有重要的理论和实际意义^[8-9]。

目前研究用户用能行为的文献较多^[10-13], 但大多集中于用户用电行为的研究层面, 主要采用聚类分析方法。文献[11]分析了电力用户价值并建立指标体系, 从不同维度对用户进行聚类, 但未考虑用户用电方式的差异。文献[12]基于云计算平台和并行 k-means 聚类算法, 建立用户用电等时间特征序列, 研究智能小区的居民用电行为。文献[13]提取了用户的价值特征并采用近邻传播法对特征值进行聚类并划分用户群体, 为供电公司提供策略参考。

以上研究大多遵循静态决策的思想, 仅从用电特征进行聚类分析, 未计及售电公司与用户的动态交互过程以及双方的经济效益, 无法全面地评估用户在市场竞争机制下的用电行为。而事实上, 供需双方的主动性和灵活性较强, 在市场博弈过程中其决策并非一成不变, 而是可以根据博弈对象的响应, 动态地调整自己的决策从而实现经济效益的最大化。因此, 基于博弈理论研究售电过程中供需双方的动态决策过程和效益是一种可行的思路。文献[14]研究了在新的电价模型和目标函数下的需求侧博弈, 面向用户用电行为, 构建了单家售电公司与多个用户交互的两层博弈模型。文献[15-16]计及售电价格与用户状态的交互过程, 在文献[14]的基础之上提出一种针对多个售电商和多个用户的两层博弈模型。与前述文献仅研究单一用户群体不同, 文献[17]初步探索了一种考虑居民、工业、商业用户三种用户群体, 计及可中断负荷的用户效用模型, 并基于演化博弈理论分析用户对售电公司的选择行为。以上文献均基于博弈理论描述电力市场中供需双方的动态交易决策过程和用户的用电行为。然而, 上述研究均是针对电力用户的用能行为。事实上, 从整体来看, 用户的用能行为不仅仅局限于电能领域, 其是一个在多元化能源中动态选择的过程, 因此, 需要研究一种面向不同能源形式的多元化用户用能行为决策方法。而从现有文献看, 针对不同类型用户群体及其在多种能源形式间的动态选择行为的研究, 尚未见报道。

综合能源系统中影响用户用能行为的因素众多, 且通常包含大量随机性和波动性因素, 因而难以建立准确的数学模型对用户用能行为进行分析。一方面, 用户无法对供能信息的改变做出实时最优的反映, 即选择是“有限理性”的; 另一方面, 在综合用能环境下, 相较于个体的选择, 用户的综合用能行为更多地表现为一种群体性行为。而演化博弈具有有限理性^[18]和关注群体行为^[19]等特点, 因此可以被看作是研究用户综合用能行为决策问题的一种有效手段。

综上所述, 本文提出一种基于演化博弈的用户综合用能行为决策方法。首先以居民用户、大工业用户以及商业用户等三种类型用户为主体, 基于主客观组合赋权法, 构建了一种考虑用户用能特性和用户舒适度因素的效用模型。在此基础上, 基于演化博弈方法提出用以描述用户用能选择动态过程的博弈模型。最后采用分布式迭代求解方法对模型进行求解, 从而得到演化均衡结果。与传统方法相比, 本文方法针对用户的多元化用能选择行为问题, 充

分考虑了用户选择消费不同能源的动态演化博弈过程, 从而具有较高的精确性和有效性。算例结果验证了本文方法的有效性, 且相关研究能够为供能商制定合理的定价策略提供参考。

1 用户效用指标构建

本文综合考虑用户在综合能源市场中对能源价格、激励政策的反应机制, 从用能特性和用户心理等角度出发构建用户效用评价指标体系, 其主要包括 4 个指标: 综合用能成本(B_1)、供能占有率(B_2)、供能可靠率(B_3)、用户舒适度(B_4)。

1) 综合用能成本

不同能源类型的用能价格会直接影响用户的用能成本, 从而进一步影响用户的用能选择决策。同时, 在实际用能过程中, 由于存在前期设备投资和运行期间电转气、气转热等多种能源类型彼此转换等情况, 由此带来的各个阶段下综合用能效益也同样会影响其用能选择决策。

综合上述因素, 为保证供能商在综合能源市场竞争中的效益, 本文引入全寿命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)理论, 考虑能源设备从投入使用到折旧整个过程期间需要的费用总和。因此, 本文从不同类型用户群体角度, 运用 LCC 方法^[20]研究其综合用能成本, 主要考虑系统投入安装费用和运行维护费用。设研究周期为 T , 在研究周期内 m 类型用户若选择能源类型 n , 则 LCC 计算的 m 类型用户选择能源类型 n 的数学模型为

$$\begin{cases} LCC = IC + OC \frac{(1+i)^y - 1}{(1+i)^y} + DC(1+i)^{-y} \\ B_1 = LCC / \sum_{t=1}^T L_n^m(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: LCC 为全寿命周期成本; IC 为初始投资成本; OC 为运维成本; DC 为残值; $L_n^m(t)$ 为 m 类型用户选择能源类型 n 在第 t 时段实际用能负荷; y 为经济寿命周期, 年数; i 为折现率。

其中, IC 为用户首次选择能源类型 n 对应的设备初始投资成本; OC 主要包括运行所产生的不同能源类型负荷的使用费用以及能源设备改造过程中的更改维护费用; DC 依据能源设备残值率选定。各个成本的具体模型如下。

$$IC = IC_{n,inv}^m = \phi_{0,n}^m \cdot x_{0,n}^m \quad (2)$$

$$OC = OC_{n,op}^m + OC_{n,tr}^m = \sum_{t=2}^T [p_n(t) \cdot L_n^m(t) + \gamma_{c,n}^m \cdot \Delta x_n^m(t)] \quad (3)$$

$$\Delta x_n^m(t) = x_n^m(t) - x_n^m(t-1), \Delta x_n^m(t) > 0 \quad (4)$$

式中: $IC_{n,inv}^m$ 为 m 类型用户选择能源类型 n 的初始设备投资安装成本; $OC_{n,op}^m$ 为 m 类型用户选择能源类型 n 的能源使用成本; $OC_{n,tr}^m$ 表示用户侧用能设备经其他能源形式转变带来的设备改造维护成本(即:原设备拆除和新设备安装); $\phi_{0,n}^m$ 为能源类型 n 的设备初始投资安装的费用; $\gamma_{c,n}^m$ 为能源类型由 c 变为 n 后旧设备拆除及新设备安装及维护的费用; $x_n^m(t)$ 为 m 类型用户在第 t 时段选择能源类型 n 的供能占有率($t=2,3,\dots,n$); x_{0n}^m 为用户首次进行选择对应的供能占有率值; $\Delta x_n^m(t)$ 取前后两次供能占有率变化量的正值, 即 $\Delta x_n^m(t) > 0$ 。

2) 供能占有率

综合能源服务市场的供能占有率可以反映市场中供能商的形象, 从而间接地影响用户的用能选择决策。一般而言, 供能占有率与用户用能的选择结果密切相关。因此本文以用户类型及负荷使用量为划分依据, 具体公式为

$$B_2 = \left(\sum_{m=1}^M x_n^m D^m \right) / \sum_{m=1}^M D^m \quad (5)$$

式中, D^m 为研究时段内 m 类型用户的总负荷。

3) 供能可靠率

供能可靠率能够直观地反映供能商的供能水平。若供能商的有效供能时间越长, 则供能可靠性越好, 相应地, 用户选择这种能源类型的概率也越高。本文采用用户有效供能时间与所研究时段的比值作为衡量供能可靠率的指标, 具体公式如式(6)。

$$B_3 = 1 - \frac{\chi_n}{H_n} \times 100\% \quad (6)$$

式中: χ_n 为选择能源类型 n 的平均失能时间, 单位为 h/类型用户; H_n 为选择能源类型 n 的能源供给时间, 单位为 h。

4) 用户舒适度

用户在选择不同类型能源的过程中, 其用能体验即用户舒适度会随外界因素影响而发生变化。文献[21-23]分别以二次函数、指数函数和对数函数形式来描述用户舒适度。本文采用一种计及环境因素影响的指数型函数来表征用户舒适度, 具体公式如式(7)。

$$B_4 = \zeta (\beta e^{-\lambda t} / t + \delta) \quad (7)$$

式中: ζ 为用户舒适度收益系数; β 为用户的用能体验系数; x_n^m 为 m 类型用户选择能源类型 n 的供能

占有率; δ 为与外界因素有关的随机量, $\delta \in (0,1)$ 。

2 基于组合赋权法的用户效用分析

用户效用函数的构建需考虑多个指标, 各指标对用户效用指标体系的影响程度不同, 因此有必要通过权重系数来确定各指标在不同类型用户群体用能行为决策中的影响。目前通常使用主观赋权法和客观赋权法两类方法来确定权重。而本文是采用组合赋权^[24]的思路来计算权重指标, 即分别采用层次分析法和变异系数法计算用户效用指标的主、客观权重值, 根据用能偏好系数 α 最终得到组合权重值, 进而构建用户效用函数模型。

2.1 基于层次分析法的主客观权重计算

作为一种常用的主观赋权法, 层次分析法被用来求解本文第一章中四项指标对应的主观权重值。计算步骤如下。

1) 根据专家经验评估上述四项指标, 结合“九级标度法”比较 b_h 与 b_{h+1} , 并记录此刻对应的标度值为 k_h 。

2) 由指标重要程度的传递性确定矩阵中其余元素, 得到判断矩阵 K'_h (K'_h 为 4 阶方阵)。

$$K'_h = \begin{bmatrix} 1 & k_1 & k_1 k_2 & k_1 k_2 k_3 \\ \frac{1}{k_1} & 1 & k_2 & k_2 k_3 \\ \frac{1}{k_1 k_2} & \frac{1}{k_2} & 1 & k_3 \\ \frac{1}{k_1 k_2 k_3} & \frac{1}{k_2 k_3} & \frac{1}{k_3} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3) 经过一致性检验后, 得到主观权重值 $\omega_{1T,h}^m$ 。

$$\begin{cases} M_h = \prod_{p=1}^4 K'_{hp} \\ G_h = \sqrt[4]{M_h} \\ \omega_{1T,h}^m = \frac{G_h}{\sum_{h=1}^4 G_h} \end{cases} \quad (9)$$

式中: M_h 为判断矩阵 K'_h 每一行元素的积; G_h 为 M_h 的 4 次方根; $\omega_{1T,h}^m$ 为 m 类型用户关于第 h 项指标的主观权重值。

2.2 基于变异系数法的客观权重计算

本文考虑到 B_1 、 B_2 、 B_4 等指标动态变化的特点, 采用变异系数法求解客观权重值。该方法中权重值与变异程度呈正比, 能够很好地定量衡量指标间的

重要程度。计算步骤如下。

1) 对指标进行归一化处理

假定用户决策前后的四项评价指标为 b_{hj} ($h=1,2,\dots,4$)； $j=1,2$ 表示用户更改决策前后。对 b_{hj} 进行归一化处理得到 b'_{hj} 。

$$b'_{hj} = \frac{b_{hj} - b_{hj,\min}}{b_{hj,\max} - b_{hj,\min}}, \quad h=1,2,\dots,4 \quad (10)$$

式中， $b_{hj,\min}$ 和 $b_{hj,\max}$ 分别为第 h 项指标在决策更改前后的最小值、最大值。

2) 求解变异系数 V_h

$$\begin{cases} \bar{b}'_h = \frac{1}{2}(b'_{h1} + b'_{h2}) \\ s_h = \sqrt{\frac{1}{2}[(b'_{h2} - \bar{b}'_h)^2 + (b'_{h1} - \bar{b}'_h)^2]} \\ V_h = \frac{s_h}{|\bar{b}'_h|} \end{cases} \quad (11)$$

式中： \bar{b}'_h 为第 h 项指标的平均值； s_h 为第 h 项指标的标准差； V_h 为第 h 项指标的变异系数值。

3) 确定 m 类型用户关于第 h 项指标的客观权重 $\omega_{2T,h}^m$ 。

$$\omega_{2T,h}^m = \frac{V_h}{\sum_{h=1}^4 V_h}, \quad h=1,2,\dots,4 \quad (12)$$

2.3 基于组合权重的用户效用模型的构建

主观权重具有一定的主观性，客观权重无法直观地描述各指标对整体效用的重要程度。为兼顾用户效用评估体系的科学性及其重要性，本文采用组合赋权法求解 m 类型用户关于第 h 项指标的组合权重值，组合权重值计算如式(13)。

$$\omega_{T,h}^m = \alpha \cdot \omega_{1T,h}^m + (1-\alpha) \cdot \omega_{2T,h}^m \quad (13)$$

式中： $\omega_{1T,h}^m$ 和 $\omega_{2T,h}^m$ 分别为 m 类型用户关于第 h 项指标的主观权重值和客观权重值； α 表示用能偏好系数。

结合式(1)一式(7)计算得到各指标值，上述指标经过归一化处理，将其与式(13)的组合权重值加权运算，得到 $m(m \in M)$ 类型用户选择能源类型 $n(n \in N)$ 的效用函数，公式为

$$U_n^m = \omega_{T,1}^m B_1^m + \omega_{T,2}^m B_2^m + \omega_{T,3}^m B_3^m + \omega_{T,4}^m B_4^m \quad (14)$$

在用户效用函数中， B_1 、 B_2 、 B_4 指标与用户群体特性和群体状态有关，即其数值会在动态演化中不断更新。

3 基于演化博弈的用户用能行为决策

3.1 演化博弈模型

本文的演化博弈模型主要包含以下三个要素：参与者群体、策略和效用。具体描述如下：

1) 参与者群体。不同类型 ($m \in M$) 用户群体。

2) 策略。用户从能源类型 $n \in N$ 中确定自己的能源消费比例。

3) 效用。不同类型用户 ($m \in M$) 选择能源类型 n 所得的效用。

采用演化博弈分析用户综合用能行为决策，电气、热供能商首先向不同类型用户发布供能信息，然后用户根据式(14)计算其选择能源类型 n 的效用并以此为基础更新自身博弈策略；供能商则根据当前用户群体的选择状态更新供能占有率并发布给用户。双方在演化博弈过程中实现最终的演化均衡状态^[25]。用户与不同能源类型之间的博弈关系如图1所示。

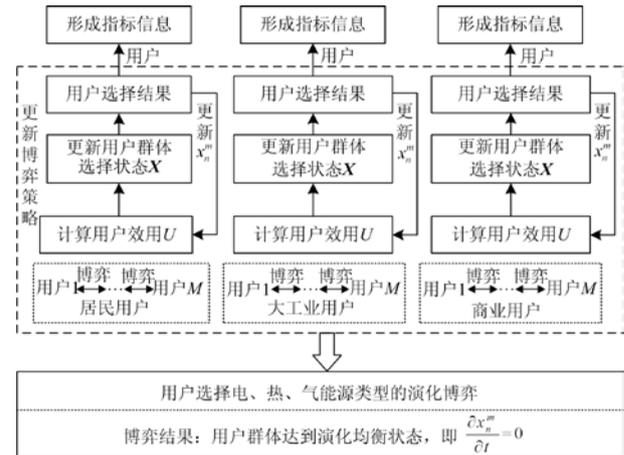


图1 用户选择能源类型的演化博弈关系

Fig. 1 Evolutionary game relation of user's choices for energy types

记 $x_n^m(t)$ 为 t 时段 m 类型用户选择能源类型 n 的用户比例， $x_n^m(t)$ 满足 $0 \leq x_n^m(t) \leq 1$ 和 $\sum_{n=1}^N x_n^m(t) = 1$ 。 m 类型用户的群体状态可表示为 $\mathbf{X}^m = [x_1^m, \dots, x_n^m, \dots, x_N^m]$ 。区域内用户群体状态可由矩阵 \mathbf{X} 表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_n^1 & \cdots & x_N^1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^m & \cdots & x_n^m & \cdots & x_N^m \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^M & \cdots & x_n^M & \cdots & x_N^M \end{bmatrix} \quad (15)$$

用户在选择能源类型的过程中会不断更新效用函数并根据效用函数完成自身策略的优化。故本文引入修正因子 $\rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})]$ 来表征 m 类型用户从策略 q 转移至 n 的比例。在任意随机的时间点, 每个用户均可通过 $\rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})]$ 成比例地从策略 q 转移至 n 。假定所有用户均对自己策略进行修正, 上述用户群体状态 \mathbf{X} 的动态变化过程可以通过微分方程进行描述, 如式(16)。

$$\frac{\partial x_n^m}{\partial t} = \sum_{q=1}^N x_q^m \rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})] - x_n^m \sum_{q=1}^N \rho_{n,q}^m [U^m(\mathbf{X})] \quad (16)$$

式(16)中等式右侧第一项和第二项分别表示 m 类型用户从选择其他策略更改为策略 n 以及从策略 n 转而选择其他策略的用户比例。其中, $\rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})]$ 与当前用户效用函数和用户群体状态有关。为构建用户选择比例和可选策略之间的数学关系, 本文采用 Logit 离散选择模型^[26-27]求解, 公式如式(17)。

$$\rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})] = \frac{\exp[U_n^m(\mathbf{X})]}{\sum_{l=1}^N \exp[U_l^m(\mathbf{X})]} \quad (17)$$

将上式代入式(16), 得到最终用户群体的动态变化方程如式(18)。

$$\frac{\partial x_n^m}{\partial t} = \frac{\exp[U_n^m(\mathbf{X})]}{\sum_{l=1}^N \exp[U_l^m(\mathbf{X})]} - x_n^m = \rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})] - x_n^m \quad (18)$$

由于大工业、商业用户用能比例受实际生产的限制, 存在能源负荷消纳能力受限的情况, 则选择相应负荷的用户比例约束条件为

$$\begin{cases} x_2^2(t) \in [0, 0.3] \\ x_2^3(t) \in [0, 0.3] \\ x_3^3(t) \in [0, 0.3] \end{cases} \quad (19)$$

式中, $x_2^2(t)$ 、 $x_2^3(t)$ 及 $x_3^3(t)$ 分别为大工业用户用热、商业用户用气及商业用户用热的比例。

3.2 考虑用户行为专一性的影响

在实际供能商与用户的动态选择过程中, 存在部分用户不更改自身策略、专注于选择一种固定的综合能源消费比例的情况。相应地, 不同类型供能商可由此提高各自客户群体的黏性。为进一步说明用户行为专一性对用户选择过程的影响, 本文采用选择能源类型 n 的用户群体中不倾向于更改策略的用户比例 g_n 来表征用户行为专一性。即在动态演化博弈过程中, 存在 $(1-g_n)$ 比例的用户会重新评估并调整自身的用能策略。

基于 Logit 离散选择模型的用户群体动态变化方程见式(20)。当 $g_n = 0, n \in N$ 时, 式(20)与式(18)等同。

$$\frac{\partial x_n^m}{\partial t} = \sum_{q=1}^N (1-g_q) x_q^m \rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})] - (1-g_n) x_n^m \sum_{q=1}^N \rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})] \quad (20)$$

3.3 求解方法

在三种类型用户的动态演化过程中, 用户效用随用户群体状态的改变而不断变化。本文采用分布式迭代算法求解演化均衡。将式(18)离散化, 如式(21)。

$$x_n^m(w+1) = x_n^m(w) + \lambda \cdot \{ \rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})] - x_n^m(w) \} \quad (21)$$

式中: w 表示迭代次数; λ 表示迭代步长。

本文算法的基本步骤如下。

步骤 1: 输入原始数据和参数。

步骤 2: 初始化区域内三种类型用户的用户群体状态 \mathbf{X} 。

步骤 3: 以式(8)一式(13)求解权重值为基础, 结合式(9)计算 m 类型用户选择能源类型 n 的效用。

步骤 4: 利用式(17)求解修正因子 $\rho_{q,n}^m [U^m(\mathbf{X})]$, 根据式(21)不断更新用户当前群体状态及能源类型的供能占有率。

步骤 5: 判断用户的选择行为是否达到演化均衡状态。若 $\partial x_n^m / \partial t = 0$, 则表明已达到演化均衡, 求解结束; 若 $\partial x_n^m / \partial t \neq 0$, 则未实现演化均衡, 根据当前用户群体状态计算各能源类型的供能占有率, 返回步骤 3。

4 算例分析

4.1 算例说明

本文以居民、大工业、商业用户群体 ($M=3$) 与电、气、热能源类型 ($N=3$) 之间的动态选择行为进行仿真分析。仿真程序采用 MATLAB R2016a 对第三节演化博弈模型进行求解。其中, 以两年为研究周期, 取 Δt 为 1 月, 分为 24 个月份。

由于不同形式能源的负荷单位存在差异, 为方便计算, 本文依据不同能源与标准煤之间的换算标准对电、气、热负荷单位进行统一。具体负荷量数据 $L_n^m(t)$ 如图 2—图 4 所示。指标 B_1 中经济寿命周期为 1 年, 折现率取 7%^[28]。其参数 $\phi_{0,n}^m$ 、 $\gamma_{c,n}^m$ 以及 B_3 中参数 χ_n 分别如表 1、表 2 所示。

为避免能源负荷的较大波动造成对评价结果的影响, 本文 α 取 0.6, 该参数可根据实际情况调整。基于组合赋权法的各效用指标主客观权重值

$\omega_{1T,h}^m$ 、 $\omega_{2T,h}^m$ 以及组合权重值 $\omega_{T,h}^m$ 如表 3 所示。

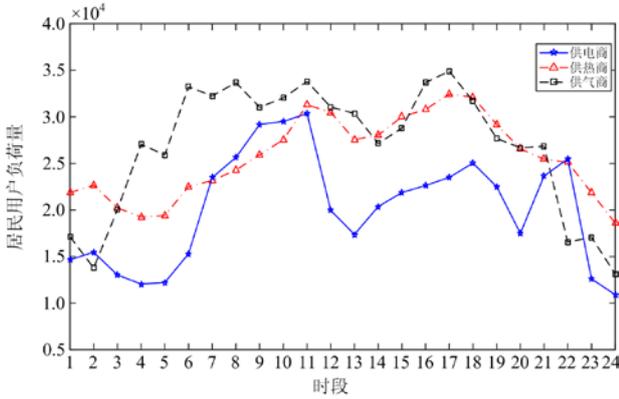


图 2 居民用户负荷量

Fig. 2 Load of resident users

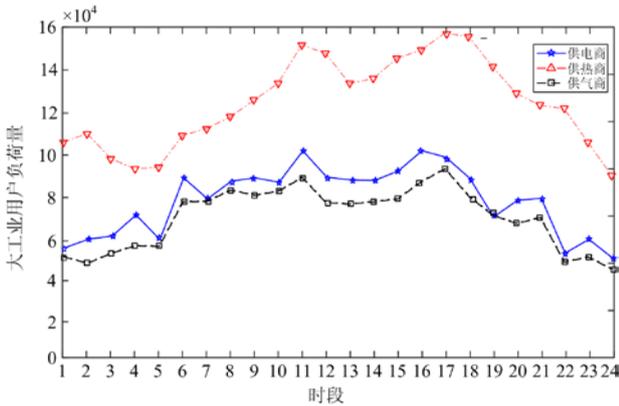


图 3 大工业用户负荷量

Fig. 3 Load of large industry users

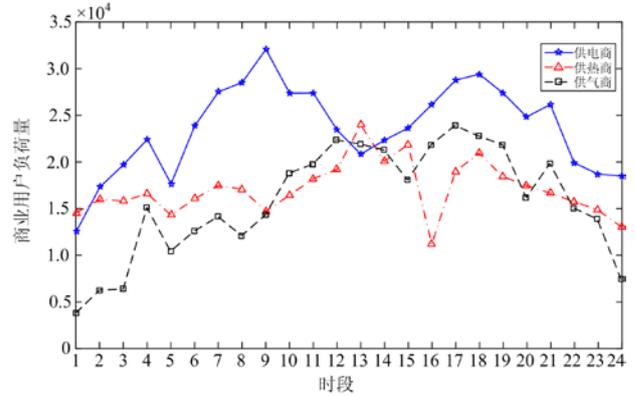


图 4 商业用户负荷量

Fig. 4 Load of business users

表 1 指标 B_1 中 $\phi_{0,n}^m$ 、 $\gamma_{c,n}^m$ 参数值

Table 1 Parameter values of $\phi_{0,n}^m$ 、 $\gamma_{c,n}^m$ in index B_1

用户类型	$\phi_{0,n}^m$ /元			用户类型	$\gamma_{c,n}^m$ /元		
	供电	供热	供气		供电	供热	供气
居民	1 900	1 750	1 600	居民	2 300	2 100	2 000
大工业	2 000	1 500	1 400	大工业	2 600	1 900	1 700
商业	1 800	1 600	1 900	商业	2 350	2 000	2 700

表 2 指标 B_3 中 χ_n 参数值

Table 2 Parameter value of χ_n in index B_3

供能类型	平均失能时间 χ_n / h
供电	0.50
供热	0.86
供气	1.05

表 3 各类型用户指标权重

Table 3 Weight of index of different types of users

权重	$\omega_{T,1}^m$			$\omega_{T,2}^m$			$\omega_{T,3}^m$			$\omega_{T,4}^m$		
	$\omega_{1T,1}^m$	$\omega_{2T,1}^m$	$\omega_{T,1}^m$	$\omega_{1T,2}^m$	$\omega_{2T,2}^m$	$\omega_{T,2}^m$	$\omega_{1T,3}^m$	$\omega_{2T,3}^m$	$\omega_{T,3}^m$	$\omega_{1T,4}^m$	$\omega_{2T,4}^m$	$\omega_{T,4}^m$
居民	0.380	0.353	0.369	0.120	0.150	0.132	0.250	0.223	0.239	0.250	0.274	0.260
大工业	0.083	0.096	0.088	0.350	0.342	0.347	0.380	0.346	0.348	0.217	0.216	0.217
商业	0.281	0.243	0.228	0.033	0.065	0.046	0.380	0.463	0.466	0.218	0.229	0.260

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 本文方法的有效性和稳定性分析

本文先不考虑用户行为专一性因素(即 $g_n=0$)，利用演化博弈方法对用户选择能源类型模型进行求解。将电、热、气能源类型在初始状态下的供能占有率分别设置为(0.27, 0.42, 0.31)及(0.33, 0.33, 0.33)，分别计算得出三种类型用户群体的综合用能选择结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出，居民、大工业、商业用户群体的选择过程均迭代收敛。除此之外，在两种不同

的供能占有率初始状态下，上述三种类型用户得到的演化均衡结果相同，这表明用户群体对不同能源类型的选择与初始状态下的供能占有率无关。

由图 5 还可以看出，居民用户群体的总能源消费负荷中，最后的电负荷、热负荷和天然气负荷的比例分别为 0.224、0.387 及 0.389。其中，居民用户用能负荷的最终演化结果中，热、气负荷的占比较高。其主要原因是，居民用户对价格和用能成本更为敏感，其用能成本的权重最高，为 0.369。相对于用电负荷而言，折算后的用气和用热单价分别低了

0.23、0.19 元, 因此, 居民用户更倾向于在综合用能负荷中, 在保证用户供能可靠性和舒适度的前提下, 尽量提高天然气和热负荷的比例。

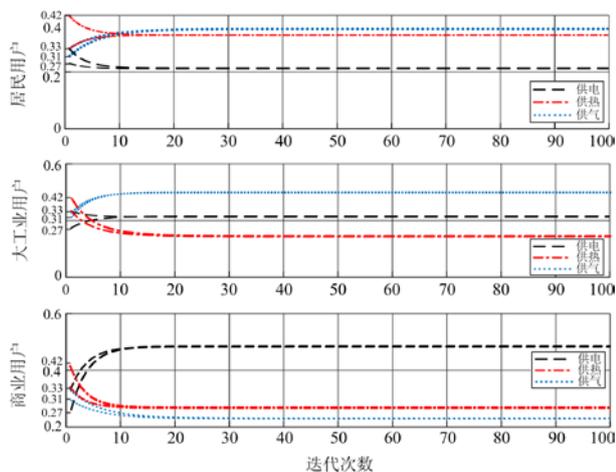


图5 三种类型用户的选择结果

Fig. 5 Selection results of three types of users

大工业用户群体的总能源消费负荷中, 最后的电负荷、热负荷和天然气负荷的比例分别为 0.308、0.234 及 0.458。其主要原因是, 与居民用户类似, 从事生产的大工业用户对用能价格也非常敏感, 因而其往往更倾向于选择一次能源供能, 所以其综合用能结果中, 天然气负荷占比较高。同时, 与居民用户不同, 大工业用户对供能可靠性要求更高, 其供能可靠性权重比居民高了 0.109。而电负荷的供能可靠性要比热负荷高出 0.015。同时受实际生产的限制, 大工业用户的热负荷消纳能力本身也不高, 所以虽然从成本角度看, 用电成本比用热成本高了 2 528.7 元, 但在最终的用能结果中, 电负荷的占比更高。

商业用户群体总能源消费负荷中, 最后的电负荷、热负荷和天然气负荷的比例分别为 0.511、0.276 及 0.213。其主要原因是, 与居民用户和大工业用户不同, 商业用户更在意用户舒适度和供能可靠性, 这两个指标的权重分别为 0.260、0.466, 是三类用户中最高的。而综合来看, 电负荷的用户舒适度和供能可靠性最优。而且由于行业原因, 商业用户将电负荷改造为其他能源形式的改造成本很高, 而且其消纳热负荷和天然气负荷的能力也有限。所以, 在商业用户的用能结果中, 其电负荷的占比最高。

4.2.2 考虑用户行为专一性分析

为进一步研究用户行为专一性对用户用能选择结果的影响, 本文以居民用户为例进行分析。为保证用户选择结果的准确性, 电、热、气能源类型在

初始状态下的供能占有率仍为(0.27, 0.42, 0.31)。当选择供电商的用户行为专一性发生变化时, 居民用户对电、热、气能源的选择结果如图 6 所示。

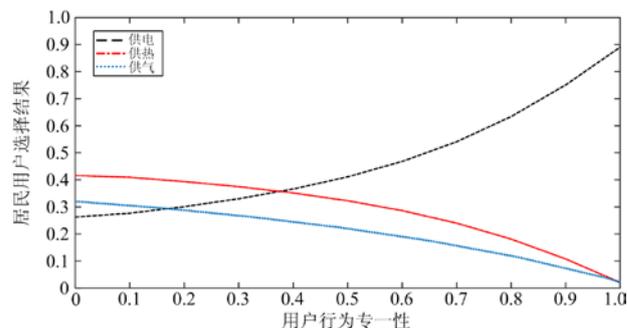


图6 不同用户行为专一性下的居民用户用电选择结果

Fig. 6 Selection results of residents' electricity consumption under the specificity of different user behaviors

由图 6 可知, 选择电能的居民用户“黏性”, 即用户行为专一性越高, 达到演化均衡时用户选择该能源的比例越大。相应地, 对于未计及用户行为专一性的供热商、供气商, 其用能占比逐渐下降。由此可见, 供能商在综合能源市场竞争过程中, 培养用户专一性的行为有利于提升其市场份额。

4.3 对比分析

为验证本文方法的正确性和有效性, 分别利用静态聚类分析法^[29]和本文方法对本文算例进行仿真, 并对比计算结果。两种方法具体如下:

1) 静态聚类分析法。直接根据三种类型用户用能特征进行聚类决策, 决策过程中不考虑不同类型负荷占比的动态变化。

2) 本文方法。根据三种类型用户用能属性特征, 同时利用演化博弈理论描述决策过程中不同类型负荷占比的动态变化。

对比两种方法的用户效用结果如表 4 所示。

表 4 两种方法的用户效用函数值

Table 4 Users' utility function values of two methods

用户类型	静态聚类分析法效用 U_n^m			用户类型	本文方法效用 U_n^m		
	供电	供热	供气		供电	供热	供气
居民	0.548	0.546	0.487	居民	0.653	0.585	0.508
大工业	1.501	1.152	1.127	大工业	1.607	1.163	1.172
商业	1.982	0.718	0.502	商业	2.032	0.788	0.535

由表 4 可知, 相较于静态聚类分析法, 利用本文方法求解的用户效用值较高。具体而言, 对于居民用户, 利用本文方法计算的供电、供热、供气效用分别高 10.5%、3.9% 及 2.1%; 对于大工业用户, 利用本文方法计算的供电、供热、供气效用分别高

10.6%、1.1%及4.5%；对于商业用户，利用本文方法计算的供电、供热、供气效用分别高5.0%、7.0%及3.3%。这表明，利用本文方法来帮助用户进行用能选择决策，其效果更好。其原因是，静态聚类分析法是从静态角度出发来评估用户用能选择的效用，未计及用户在选择自身综合用能比例的过程中，其与能源类型的动态博弈过程，使得用户和供能商在用能选择决策过程中都难以通过互动来实现自身效用的优化。与静态聚类分析法不同，本文方法是构建用户用能选择决策的演化博弈模型，保证用户和供能商能够根据演化博弈的情况动态调整自身决策来实现效用最大化，因而决策结果的有效性和精确性更高。

5 结论

本文将动态博弈的思想应用于用户的综合用能选择决策过程中，提出了一种基于演化博弈的用户综合用能行为决策方法。根据仿真算例，得到的结论如下：

1) 用户群体对不同能源类型的选择与初始状态下的供能占有率无关，仅与其用能选择偏向、不同类型能源的效用指标有关。

2) 用户行为专一性越高，达到演化均衡时用户选择该能源的比例越大，因而供能商在综合能源市场竞争过程中，培养用户专一性的行为有利于提升其市场份额。

3) 本文方法能够保证用户和供能商根据演化博弈的情况动态调整自身决策，从而实现效用的优化，因而其决策结果的有效性和精确性更高。

参考文献

- [1] 吴克河, 王继业, 李为, 等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 966-979.
WU Kehe, WANG Jiye, LI Wei, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 966-979.
- [2] 盛四清, 邱昊, 张文朝, 等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 51-56.
SHENG Siqing, QIU Hao, ZHANG Wenchao, et al. Comprehensive assessment method of new energy consumption considering steady and dynamic active power equilibrium constraints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 51-56.
- [3] QIN Chao, YAN Qingyou, HE Gang. Integrated energy systems planning with electricity, heat and gas using particle swarm optimization[J]. Energy, 2019, 188.
- [4] 马喜平, 沈涓程, 杨臣, 等. 高比例新能源微电网参与电网调峰能力评估[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(8): 62-75.
MA Xiping, SHEN Weicheng, YANG Chen, et al. Evaluation of high proportion new energy microgrids participating in peak-shaving capacity of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(8): 62-75.
- [5] 鲍玉川, 张巧霞, 张萌, 等. 基于综合能源系统的最优潮流解耦算法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 80-86.
BAO Yuchuan, ZHANG Qiaoxia, ZHANG Meng, et al. Optimal power flow decoupling algorithm based on integrated energy system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 80-86.
- [6] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.
- [7] ZHANG Xian, CHAN K W, WANG Huaizhi, et al. Game-theoretic planning for integrated energy system with independent participants considering ancillary services of power-to-gas stations[J]. Energy, 2019, 176: 249-264.
- [8] LIU N, WANG J, WANG L. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1139-1151.
- [9] WANG Yongli, WANG Yudong, HUANG Yujing, et al. Planning and operation method of the regional integrated energy system considering economy and environment[J]. Energy, 2019, 171: 731-750.
- [10] 刘云, 张杭, 张爱民. 需求侧响应下基于负荷特性的改进短期负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 126-133.
LIU Yun, ZHANG Hang, ZHANG Aimin. Improved load forecasting method based on load characteristics under demand-side response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 126-133.
- [11] 王璨, 冯勤超. 基于价值评价的电力用户分类研究[J]. 价值工程, 2009, 28(5): 64-67.
WANG Can, FENG Qincao. Research on power user classification based on value evaluation[J]. Value Engineering, 2009, 28(5): 64-67.

- [12] 张素香, 刘建明, 赵丙镇, 等. 基于云计算的居民用电行为分析模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1542-1546.
ZHANG Suxiang, LIU Jianming, ZHAO Bingzhen, et al. Cloud computing-based analysis on residential electricity consumption behavior[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1542-1546.
- [13] 魏小曼, 余昆, 陈星莺, 等. 基于 Affinity propagation 和 K-means 算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 15-19, 35.
WEI Xiaoman, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Analysis of power large user segmentation based on Affinity propagation and K-means algorithm[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 15-19, 35.
- [14] FADLULLAH Z M, QUAN D M, KATO N, et al. GTES: an optimized game-theoretic demand-side management scheme for smart grid[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(2): 588-597.
- [15] 代业明, 高岩, 高红伟, 等. 智能住宅小区的需求响应主从博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 88-94.
DAI Yeming, GAO Yan, GAO Hongwei, et al. A Stackelberg game model based on demand response of intelligent residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 88-94.
- [16] CHAI B, CHEN J, YANG Z, et al. Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 722-731.
- [17] 孙云涛, 宋依群, 姚良忠, 等. 售电市场环境下电力用户选择售电公司行为研究[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1124-1131.
SUN Yuntao, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Study on power consumers' choices of electricity retailers in electricity selling market[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1124-1131.
- [18] 关宏志, 浦亮. 基于演化博弈理论的有限理性交通选择行为模型[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(8): 1077-1083.
GUAN Hongzhi, PU Liang. A drivers' choice behavior model based on evolutionary game theory[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(8): 1077-1083.
- [19] 乔根·W·威布尔. 演化博弈论[M]. 上海: 上海人民出版社, 2015.
- [20] 房华荣. 基于寿命周期成本(LCC)的暖通空调方案选择的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
FANG Huarong. Decision-making analyse of heat ventilation and air-conditioning construction based on life cycle cost[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [21] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD H, SCHOBER R, et al. Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1170-1180.
- [22] YANG P, TANG G, NEHORAI A. A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 884-892.
- [23] JALALI M M, KAZEMI A. Demand side management in a smart grid with multiple electricity suppliers[J]. Energy, 2015, 81(1): 766-776.
- [24] 郭海洋, 程浩忠, 马则良, 等. 基于概率论和组合赋权法的电能质量综合评估[J]. 智能电网, 2017, 5(6): 524-528.
GUO Haiyang, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on probability theory and combination weighting method[J]. Smart Grid, 2017, 5(6): 524-528.
- [25] 程乐峰, 余涛. 开放电力市场环境多群体非对称演化博弈的均衡稳定性典型场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5687-5703.
CHENG Lefeng, YU Tao. Typical scenario analysis of equilibrium stability of multi-group asymmetric evolutionary games in the open and ever-growing electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5687-5703.
- [26] CHEN Yanbo, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. An improved recursive Bayesian approach for transformer tap position estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2830-2841.
- [27] CHEN Yanbo, LIU Feng, HE Guangyu, et al. A seidel-type recursive Bayesian approach and its applications to power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1710-1711.
- [28] 虞和锡. 工程经济学[M]. 北京: 中国计划出版社, 2002: 5-9.
- [29] DE GREVE Z, LECRON F, VALLEE F, et al. Comparing time-series clustering approaches for individual electrical load patterns[J]. Open Access Proceeding Journal, 2017, 2017(1): 2165-2168.

收稿日期: 2020-05-08; 修回日期: 2020-07-30

作者简介:

黄悦华(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网, 新能源微电网、综合能源系统; E-mail: hyh@ctgu.edu.cn
王艺洁(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化调度; E-mail: 1067437419@qq.com

杨楠(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划, 电力系统的机组组合, 主动配电网. E-mail: ynyyayy@ctgu.edu.cn

(编辑 魏小丽)