

# 基于用户用电特征的售电套餐策略研究

喻洁, 钱长钰, 宋佳霖, 张彤彤

东南大学, 江苏省南京市玄武区四牌楼2号动力楼 210096;

## Research on power sales package strategy based on user's electricity consumption characteristics

Yu Jie, Qian Changyu, Song jialin, Zhang Tongtong

School of electrical engineering, Southeast University, Nanjing.

**摘要:** 在当前我国电力体制改革的环境下, 为提高售电公司的竞争力, 本文尝试提出一种基于用户用电特征的售电套餐策略, 以供售电公司在对目标客户进行分析整合、实施差异化的营销策略时参考。本文在用户特征的分析中采用了聚类算法, 通过对用户的日负荷曲线进行数据处理和聚类分析, 将用户依据其在负荷曲线上表现出的用电特征进行分类, 并引入负荷特性指标对每一类用户进行分析, 量化用电特征。在此基础上提出了一套基于需求响应和用户满意度的售电套餐优化策略, 引入用户对电价的自弹性系数将需求响应量化, 给出了以售电公司利润和用户满意度最大化为目标的双目标规划模型。算例中, 本文利用聚类算法将数据中的所有用户分为了不同类, 每一类之间的日负荷曲线以及负荷特性指标都有显著差别。之后针对每一类用户设计了售电套餐, 并模拟了售电套餐实施后的效果。模拟结果显示售电套餐的实施不仅促进了削峰填谷还能减少用户的用电成本, 并且还考虑了售电公司的利润和客户满意度, 通过改变两个目标函数的权值求出了帕累托前沿, 以供售电公司参考。

**关键词:** 售电套餐; 聚类算法; 需求响应; 用户满意度

**ABSTRACT:** In the current environment of China's electric power system reform, in order to help the power selling companies become more competitive in the future market competition, this paper tries to propose a power selling package strategy based on the characteristics of users, so as to provide a reference for the power selling companies to analyse and integrate the target customers and implement differentiated marketing strategies in the future. In this paper, clustering algorithm is adopted in the analysis of user characteristics. Through data processing and clustering analysis of daily load curve of users, users are classified according to their electricity consumption characteristics on the load curve, and load characteristic indexes are introduced to analyse each type of users, to quantify their electricity consumption characteristics. After that, this paper proposes a set of optimization strategies for electricity package sales based on demand response and user satisfaction, and quantifies the demand response by introducing the self-elastic coefficient of electricity price of users, and designs a dual-objective planning model aiming at maximizing the profit of electricity companies and user satisfaction. In addition, all theoretical studies are simulated by examples. In the example, this paper uses clustering algorithm to divide all users in the example data into different classes, and there are significant differences in daily load curves and load characteristic indexes between each class. After that, this paper designed the electricity package for each type of users, and simulated the effect after the implementation of the electricity package. The simulation results show that the implementation of the power package can reduce users' electricity cost while cutting peak and filling valley. Meanwhile, the profit and customer satisfaction of the power selling companies are also considered. The pareto front is calculated by changing the weights of the two objective functions for the reference of the power selling companies.

**KEY WORD:** Power Package, Clustering Algorithm, Demand Response, User Satisfaction

## 1 引言

### 1.1 背景

随着我国电力体制市场化改革的不断深

化, 售电侧改革是其核心内容之一, 也是主要任务之一。售电侧的改革意味着售电侧需要构建全新的市场化运营机制, 售电侧市场机制的组成部分之一就是成熟完善的零售电力定价机

制,而售电套餐便是其中的重要内容。与此同时,电力套餐的设计也是各零售电力商进行市场竞争、客户吸引和保留的重要手段。

目前我国零售电商尚处于起步阶段,其发展模式尚在探索。在电力市场化改革的环境下,如何合理的设计售电套餐,是售电公司确保自身市场竞争力,拓宽现有市场的重要手段。目前,与外国成熟且多样化的电力市场不同,我国电力市场套餐体系处于初级阶段,尚未开发出成熟的具有普适性的设计方法,在市场化改革不可逆转的形势下,这种情况亟待解决。

## 1.2 研究现状

国外的售电市场机制已经较为成熟且竞争充分,售电商以吸引客户、削峰填谷等目的出台了多种售电套餐。而在国内,关于售电套餐的研究主要分为客户分类和售电套餐设计两部分。

### 1) 国外售电套餐调研

在美国得克萨斯州,包括 Direct Energy 在内的德州零售电力供应商推出的电力套餐体系按定价模式可以分为固定费率套餐(fixed rate product)、可变费率套餐(variable rate product)和指数费率套餐(indexed rate product)<sup>[1]</sup>。英国在标准单位电价之外,还为安装分时电价电表的用户提供不同的分时电价,以 Economy7 为例,以 7 个小时为波谷时间长度,电价白天高晚上低,以实现削峰填谷的效果。此外英国政府还推出了上网电价(feed-in tariff),以鼓励国内的可再生能源和低碳发电<sup>[2]</sup>。在澳大利亚,电价套餐主要包括零售电价套餐、太阳能电力套餐和绿色能源套餐,其中零售电价套餐依据用户类型、签订合同期限的长短、合约期限几个维度设计出多种套餐<sup>[3]</sup>。

### 2) 国内售电套餐研究

针对电价套餐的设计、优化和评价,国内学者与专家已经开展了大量研究并取得了相应的重要成果,主要分为用户分类和售电套餐设计两类。

#### a) 用户分类方法

在对用户的特征分析和提取上,孙毅和顾玮等人提出了一种基于差异化特征提取的用户

分层聚类方法<sup>[4]</sup>,并对传统的 k-medoids 聚类算法进行改进,实现了聚类数目可变的自适应 k-medoids 算法。为两层聚类后的子类用户推荐合适的电价套餐。

#### b) 售电套餐设计

Qitian Mu 和 Yajing Gao 提出了一种考虑用户侧储能配置的售电公司电力供应套餐设计方法<sup>[5]</sup>,建立了基于成本-效益系统的储能配置优化模型。为了确定系统存储容量的最优储能容量,采用非优势排序的精英策略遗传算法(NSGA-II)作为方法求解模型。根据储能的成本效率和合同的签署时期,设计出了结合储能配置的电价套餐以供用户选择。

喻小宝和谭忠富等人也在其研究中也通过对客户群体进行分类,提出了一种及与电力客户评估的差异化电价套餐研究<sup>[6]</sup>,构建了一种电力客户评估指标体系,引入多目标优化的权重设计模型,从多个维度对电力客户进行了评估和划分,并设计了相对应的差异化套餐。

与之相比,窦迅和王俊等人基于售电商与拓展目标用户前后的单位产出投入比,分析目标用户对售电商的贡献度,建立考虑用户贡献度的售电商购售电决策优化模型,从而帮助售电商甄别对自己最有价值的用户,制定相应的合同套餐<sup>[7]</sup>。

## 2 用户用电特征分析

售电公司在运作过程中,针对不同类型的客户需要制定不同的售电套餐策略。而对用户用电特征进行分析,其主要目的是可以帮助售电公司明确不同用户的典型用电模式<sup>[8]</sup>,从而进行市场细分,使其制定售电套餐的过程变得更加科学合理,更具有理论依据。

### 2.1 用户用电特征分类方法及有效性指标

本文拟选取 k-means 算法对具有不同用电特征的用户进行分类。k-means 算法具有聚类效果较好且计算原理简单等优点,但是其聚类数目需要预先指定。由此,如何对 k 值不同,即不同聚类数目的聚类结果进行评价显得尤为重要。特别是对于数量较多、维数较高的数据集,在聚类算法运行前无法认为推断出聚类应有的数目。

本文决定采用 Silhouette 指标对不同类数的聚类结果进行评价<sup>[9]</sup>。Silhouette 指标也就是轮廓系数 (Silhouette Coefficient)，其通过考虑聚类结果同一类之内的数据之间的近似程度和不同类之间数据相差程度来对聚类的质量进行评价，由此确定最为合适的聚类数目。

选取所有数据的 Silhouette 指标的平均值对整个聚类结果进行质量评价，均值越大则说明聚类结果质量越高，而其为负值则说明至少某一个数据的 Silhouette 指标为负，说明聚类结果失效。

### 2.2 用户用电特征分类数据预处理

本文的售电套餐是基于分时电价设计，因而对于用电特征主要关注的是用户一天内二十四小时的负荷变化特点，即其具有的波动幅度、波动频率、变化趋势以及峰谷平时段等特征。在将用户的日负荷曲线代入聚类算法进行聚类之前，需要对其进行无量纲化处理，统一不同数据的数量级，使其只表现波动和变化趋势等特性。

本文采用无量纲化处理中计算较为简单的极值化方法。对于数据集合  $D$  中的第  $i$  个数据  $x_i$ ，对其应用极值化方法进行无量纲化处理的方式主要有以下三种：

$$x'_i = \frac{x_i}{\max(D) - \min(D)} = \frac{x_i}{R(D)} \quad (1)$$

$$x'_i = \frac{x_i - \min(D)}{\max(D) - \min(D)} = \frac{x_i - \min(D)}{R(D)} \quad (2)$$

$$x'_i = \frac{x_i}{\max(D)} \quad (3)$$

其中  $x'_i$  为  $x_i$  无量纲化处理之后的值， $\max(D)$  为数据集合  $D$  中的最大值， $\min(D)$  为数据集合  $D$  中的最小值， $R(D)$  为数据集合  $D$  的极差。

显然，在使用式(1)和式(2)对集合  $D$  的所有数据进行处理之后，该曲线的极差，也就是波动幅度被转化为一个确定的值。而如果对于多条不同的曲线，其波动幅度不同，在经过方

式(1)和方式(2)处理后，其波动性的差异会被抵消，原本平稳的曲线波动性会被放大导致其原来的特性难以识别。用方式(3)后不仅统一了数量级，也较好地保留了其原来的用电特性，因此本文最终选择方式(3)。

### 2.3 用户用电特征的量化评价

尽管聚类算法理论上可以以用户的日负荷曲线为依据，将所有用户根据其用电特征进行分类，但是售电公司依然需要一些方式对不同类的用户进行量化分析。这不仅可以帮助售电公司在营业过程中对新用户的用电特征进行快速的识别并将其匹配到已有的售电套餐体系中，也可以帮助其日后对现有的所有用户业务进行整理和改进。

分析用户的用电特征，也就是分析其负荷特性，除了从聚类算法已经用到的负荷曲线出发，还可以通过引入一些参数指标来对其进行量化。这些指标应当可以反映上文所述的用户用电负荷<sup>[10]</sup>的波动幅度、波动频率以及变化趋势等特征。在此，本文参考文献[11]，从峰、谷、平以及全天四个时段，选取了6个负荷特性的评价指标，尝试对用户的日负荷特性进行较为全面的评价。具体的指标及其物理意义如表1所示。表中  $P$  代表用户负荷；上标  $peak$ 、 $sh$  和  $val$  分别代表峰、平、谷三个时段；下标  $max$ 、 $min$ 、 $sum$  和  $av$  分别代表最大值、最小值、总量和平均值。

表1 负荷特性评价指标  
Table 1 load characteristic evaluation index

评价指标	定义	时段	物理意义
负荷率	$\frac{P_{av}}{P_{max}}$	全天	全天负荷变化
最高利用小时率	$\frac{P_{sum}}{24 * P_{max}}$	全天	负荷的时间利用效率
日峰谷差率	$\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}}$	全天	负荷的调峰能力
峰时负载率	$\frac{P_{av}^{peak}}{P_{av}}$	峰时段	峰时段负荷变化
平时负载率	$\frac{P_{av}^{sh}}{P_{av}}$	平时段	平时段负荷变化
谷时负载率	$\frac{P_{av}^{val}}{P_{av}}$	谷时段	谷时段负荷变化

### 3 售电套餐设计

#### 3.1 计及需求响应和用户满意度的售电套餐优化策略

本文综合考虑售电公司的利润和用户对价格的变化的响应,提出一套基于用户需求响应<sup>[12]</sup>和满意度的售电套餐优化策略。该策略中售电套餐是基于分时电价设计的,将一天分为T个时段分别设定电价,售电套餐的优化模型如下所示,其决策变量为一天T个时段每个时段的电价。

$$\max_{P_t^{sale}} \text{Pr ofits} \quad (4)$$

$$\max_{P_t^{sale}} S \quad (5)$$

约束条件为:

$$Q_t^{\min} \leq Q_t^{real} \leq Q_t^{\max} \quad (6)$$

$$P_t^{sale} \geq 0 \quad (7)$$

式中,  $t \in [1, T]$ , 代表第t个时刻; Profits代表售电公司的利润; S代表用户满意度;  $P_t^{sale}$ 代表在第t个时刻对用户采取的售电价格;  $Q_t^{\min}$ 和 $Q_t^{\max}$ 分别代表在第t个时刻用户用电量的最小值和最大值。

本文采用的是双目标的规划模型,其目标函数是实现售电公司利润和客户满意度最大化,下文中将对每个目标函数以及约束条件的具体表达式进行详细推导和解释。

#### 3.2 售电公司利润

本文中售电公司利润最大化的目标函数表达式如下:

$$\max_{P_t^{sale}} \text{Pr ofits} = \sum_{t=1}^T (P_t^{sale} - P_t^{buy}) Q_t^{real} \quad (8)$$

式中,  $P_t^{sale}$ 表示在第t个时段的售电价格;  $P_t^{buy}$ 表示在第t个时段售电公司从批发市场的购电价格;  $Q_t^{real}$ 表示该售电套餐的目标用户在实施分时电价政策后第t个时段的实际用电量。

定义电价的自弹性系数K建立 $Q_t^{real}$ 和 $P_t^{sale}$ 之间的数学关系<sup>[13]</sup>,实现用户需求响应的量化表达, K的表达式如下:

$$K_t = \frac{Q_t / Q_t^{pre}}{P_t / P_t^{be}} \quad (9)$$

$$Q_t = Q_t^{real} - Q_t^{pre} \quad (10)$$

$$P_t = P_t^{real} - P_t^{be} \quad (11)$$

式中,  $K_t$ 代表第t个时刻该用户对电价的自弹性系数;  $Q_t$ 代表第t个时段用户在实施售电套餐前后的用电量变化;  $P_t$ 代表第t个时段用户在实施售电套餐前后的售电价格变化;  $P_t^{be}$ 代表在实施售电套餐之前,用户在往年同一时刻购电的电价;  $Q_t^{pre}$ 代表售电公司通过用户往年同时期的负荷曲线,预测出的用户在当前第t个时段未实施售电套餐的情况下可能的用电量。

从数学意义上来讲,用户对电价的自弹性系数K代表了该时段内电价的变化与用户用电量变化的量化关系,物理意义上说自弹性系数K代表了用户对电价变化的响应能力。由此,可以在 $Q_t^{real}$ 和 $P_t^{sale}$ 之间建立数学关系,得出实施售电套餐后用户用电量变化率的列向量如下:

$$\begin{bmatrix} Q_1 / Q_1^{pre} \\ \vdots \\ Q_T / Q_T^{pre} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 / P_1^{be} \\ \vdots \\ P_T / P_T^{be} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, T代表全天的时段数。

之后代入式(10)和式(11),可以得出实施售电套餐后,用户在电价变化后全天的用电量向量如下:

$$\begin{bmatrix} Q_1^{real} \\ \vdots \\ Q_T^{real} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_1 Q_1^{pre}}{P_1^{be}} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_T Q_T^{pre}}{P_T^{be}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^{sale} \\ \vdots \\ P_T^{sale} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1-K_1) Q_1^{pre} \\ \vdots \\ (1-K_T) Q_T^{pre} \end{bmatrix} \quad (13)$$

将式(13)代入式(8),可以明显看出该目标函数为二次函数,将其整理为二次规划中目标函数的标准形式,如下:

$$\max_{P_t^{sale}} \text{Pr ofits} = \begin{bmatrix} Q_1^{pre} - K_1 Q_1^{pre} \left(1 - \frac{P_1^{buy}}{P_1^{be}}\right) \dots Q_T^{pre} - K_T Q_T^{pre} \left(1 - \frac{P_T^{buy}}{P_T^{be}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^{sale} \\ \vdots \\ P_T^{sale} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$+ \frac{1}{2} [P_1^{sale} \dots P_T^{sale}] \begin{bmatrix} \frac{K_1 Q_1^{pre}}{P_1^{be}} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_T Q_T^{pre}}{P_T^{be}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^{sale} \\ \vdots \\ P_T^{sale} \end{bmatrix} + C, t \in [1, T]$$

$$C = \sum_{t=1}^T (K_t - 1) Q_t^{pre} P_t^{buy} \quad (15)$$

式(14)即为售电公司利润最大化目标函数的二次规划标准形式。式中C代表一个常数。

由式(15)可以看出  $C$  的大小是不变的, 在二次规划的计算中不需要对其进行考虑, 所以在此将  $C$  单独列出。

### 3.3 用户满意度

本文中用户满意度<sup>[14]</sup>主要从用户对用电成本即电费支出的角度考虑, 将电价变化对用户满意度的影响量化, 以尝试达到用户满意度的最大化其目标函数如下:

$$\max_{P_t^{sale}} S = \frac{\sum_{t=1}^T 1 - \frac{P_t^{sale} - P_t^{be}}{P_t^{be}}}{T}, t \in [1, T] \quad (16)$$

### 3.4 售电套餐优化模型求解方法

本文采用权值法, 将双目标规划模型转化为单目标二次规划模型, 将售电公司利润  $Profits$  和用户满意度  $S$  的权值分别设定为  $\omega_{pro}$  和  $\omega_s$ , 得到单目标规划函数如下:

$$\max_{P_t^{sale}} (\omega_{pro} Profits + \omega_s \varphi_{sp} S) \quad (17)$$

式中  $\varphi_{sp}$  代表满意度利润系数。

满意度的变化范围在  $[0, 1]$  左右, 而利润的数量级与之相差甚远, 为统一数量级, 使二者具有可比性, 在满意度前面乘以一个系数, 使其变化范围与利润的数量级相仿, 这个系数便是  $\varphi_{sp}$ 。从物理意义上讲, 用户的满意度上升可以增加售电公司的用户粘性, 提高公司形象, 从而提升其市场竞争力, 增加利润。满意度利润系数  $\varphi_{sp}$  便是用户满意度上升从而使售电公司利润上升这一过程的量化表现, 相当于用户满意度从 0 提高到 1, 售电公司从各种途径增加的利润。

权值  $\omega_{pro}$  和  $\omega_s$  具体取值与售电公司的偏好以及具体的用户类型有关, 一方面来说售电公司可以通过改变权值来在短期利润和用户满意度之间做出取舍, 另一方面不同用户其相应的满意度利润系数  $\varphi_{sp}$  也会不同, 每个用户其  $\varphi_{sp}$  的具体取值需要对这些用户进行相关市场调研得出, 售电公司需要根据这些用户的满意度利润系数大小再考虑设定不同的权值。通过改变  $\omega_{pro}$  和  $\omega_s$  两个权值的大小, 分别对目标函数进行优化求解, 可以求出售电公司利润与用户满意度的帕累托前沿, 更加直观的表现了利润与满意度之间的关系, 可以供售电公司和其他决策者参考。

## 4 算例分析

本文算例以广东省某售电公司的三十四四个电力用户 2019 年全年的日负荷曲线总量为研究对象, 这些用户的用电类型涵盖了水务、充电、物业、商品销售、电子生产以及钢铁制造等等不同产业, 算例样本具有数据量大且多样化的特点。由用户的原始负荷数据初步计算各个用户各个时刻的日平均负荷值, 绘制客户群的日负荷曲线, 所有用户的日负荷曲线如图 1 所示:

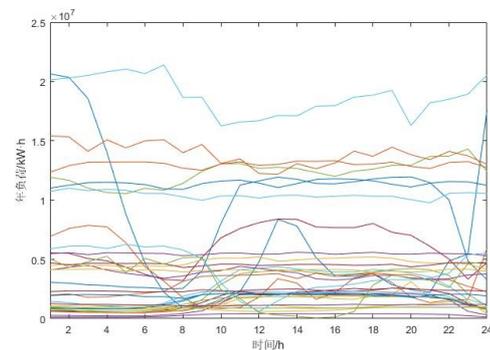


图 1 所有用户平均日负荷曲线

Fig.1 Average daily load curve of all users

### 4.1 用户用电特征分析算例

图 2 为无量纲化处理后的用户日负荷曲线, 可见曲线波动性和变化趋势变得更加明显。

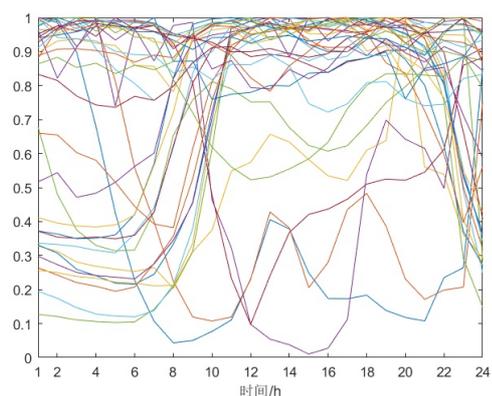


图 2 无量纲化处理后的用户日负荷曲线

Fig.2 User daily load curve after dimensionless treatment

将无量纲化处理后的日负荷曲线数据代入 k-means 聚类算法进行计算, 引入前文所述的 Silhouette 指标, 设定不同的聚类数目分别

进行聚类, 得到不同聚类数目下 Silhouette 指标的变化如图 3 所示。

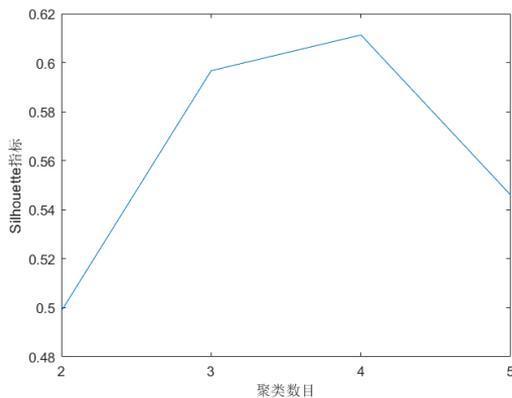


图 3 Silhouette 指标随聚类数目的变化情况

Fig.3 The change of silhouette index with the number of clusters

从上图可以看出, 当聚类数目为 4 是, 聚类结果的 Silhouette 指标达到最大值。而当聚类数目大于 5 时, 其所有数据的 Silhouette 指标中出现负值, 说明其聚类算法失效, 聚类结果不具有实际意义。图 4 为当聚类数目为 4 时, k-means 聚类算法所提取的四条曲线。

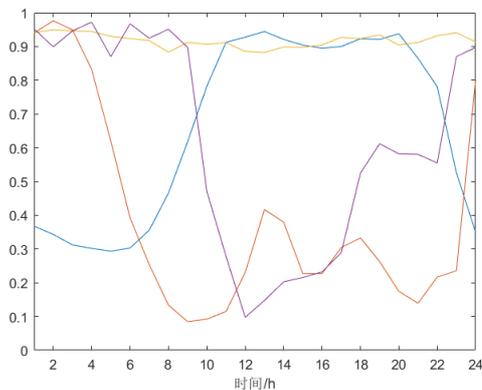


图 4 k-means 算法聚类结果

Fig.4 Clustering results of K-means algorithm

对图 4 进行分析, 可以看出聚类结果显示全部三十四个用户可以分为 4 个类。以此为基础, 根据聚类算法的分类提取出每一类所包含的用户, 并将类内所有用户日负荷曲线的平均值作为该类用户的典型日负荷曲线。之后按照用电性质和典型日负荷曲线基

本特征对每一类进行初步定义。图 5 到 12 是每一类所包含所有曲线和其典型曲线的图像。

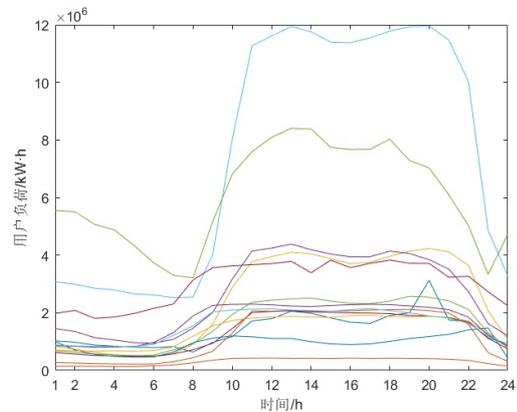


图 5 第 1 类所有用户日负荷曲线

Fig.5 Class 1 all users daily load curve

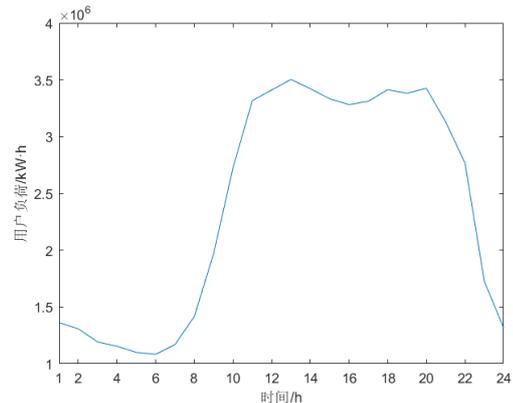


图 6 第 1 类用户典型日负荷曲线

Fig.6 Typical daily load curve of type 1 users

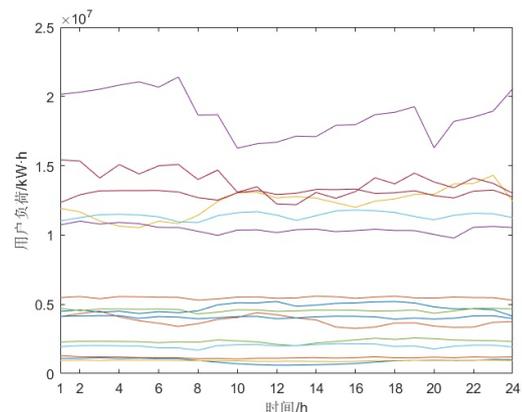


图 7 第 2 类所有用户日负荷曲线

Fig.7 Class 2 all users daily load curve

以图 5 到图 12 为基础, 并结合每一类所包含用户的用电性质, 对这些类进行初步分析和定义, 其结果如表 2 所示。

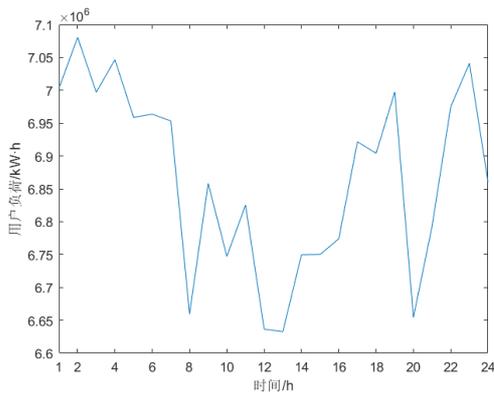


图 8 第 2 类用户典型日负荷曲线

Fig.8 Typical daily load curve of type 2 users

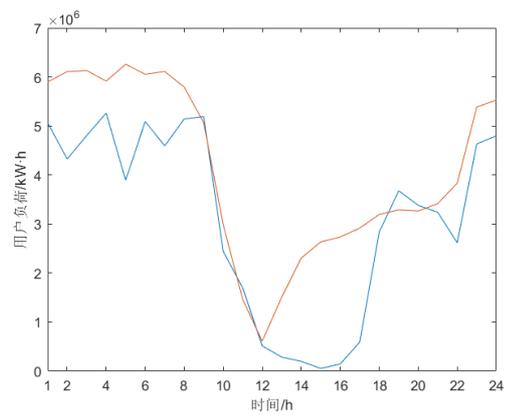


图 11 第 4 类所有用户日负荷曲线

Fig.11 Class 4 daily load curve for all users

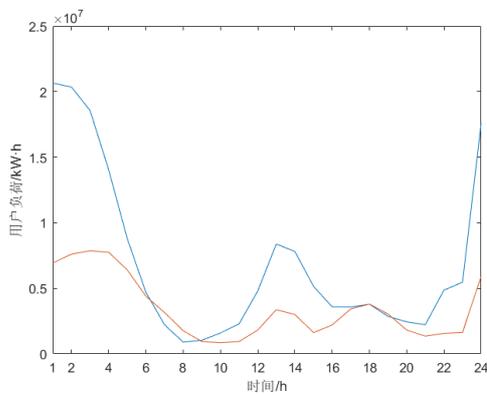


图 9 第 3 类所有用户日负荷曲线

Fig.9 Class 3 all users daily load curve

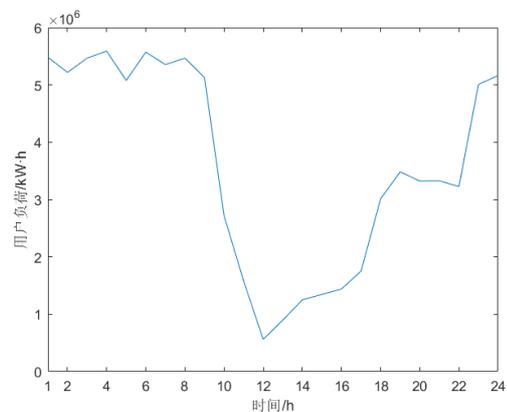


图 12 第 4 类用户典型日负荷曲线

Fig.12 Typical daily load curve of type 4 users

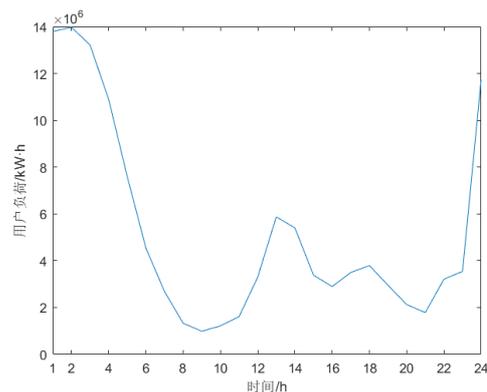


图 10 第 3 类用户典型日负荷曲线

Fig.10 Typical daily load curve of type 3 users

表 2 不同用户分类

Table 2 classification of different users

类别	名称	曲线	用户种类
1	日峰型	日峰夜谷, 呈梯形	商业零售, 地产物业, 水务公司, 科技公司
2	无峰谷型	平稳或不规律波动	污水处理, 水务公司, 钢铁生产, 电子制造, 陶瓷, 精密仪器
3	W 型	夜峰日谷, W 形	充电
4	V 型	夜峰日谷, V 形	钢铁生产

利用表 1 中所列出的 6 种负荷特性评价指标对这四种用户的用电特征进行量化, 结果如表 3 所示。因为算例所采用的数据其日负荷采样间隔为 1h, 故指标“负荷率”和指标“最高

利用小时率”的值相等，此处仅列出“负荷率”。表中峰谷平时段的划分参考《广州市一般工商业峰谷电价表》。其峰谷时段：高峰：14:00—17:00；19:00—22:00；平段：08:00—14:00；17:00—19:00；22:00—24:00；低谷：00:00—8:00。

表3 用户用电特征的量化评价

Table 3 quantitative evaluation of power consumption characteristics of users

指标	日峰型	无峰谷型	W型	V型
负荷率	0.6804 38944	0.9697 05488	0.3735 19707	0.6444 31272
日峰谷差率	0.6908 35835	0.0632 4134	0.9293 13824	0.8995 17338
峰时负载率	1.3456 317	0.9920 422	0.5392 838	0.6669 322
平时负载率	1.1822 398	0.9940 726	0.7740 105	0.7996 867
谷时负载率	0.5129 765	1.0133 776	1.6280 24	1.5001 924

从表中可以看出，每个用户类别之间都在某些指标上有显著的差别。“日峰型”的用户其峰时负载率明显高于其他用户，而其谷时负载率又低于其他用户，这与其日峰夜谷的日负荷曲线特征相符；“无峰谷型”用户日峰谷差率明显偏低，且峰、谷、平时负载率数值相仿，说明其明日负荷总体波动幅度较小。且其负荷率，也即最高利用小时率较其他用户较高，说明其具有相对较高的时间利用效率；“W型”和“V型”的用户其峰、谷、平时负载率的数据分布与“日峰型”用户恰好相反，且可以看到“W型”与“V型”用户在负载率上的值相差较大，说明“W型”在负荷的时间利用效率较“V型”更低。

这些分析结果说明，量化的用电特征评价指标不仅在波动性、峰谷分布这些特性上与日负荷曲线所体现的可视化特征相匹配，也可以分析出例如负荷的时间利用效率以及整体波动幅度这些从日负荷曲线中难以分辨的特性。

#### 4.2 售电套餐模拟分析算例

在4.1中，已经通过聚类算法对所有用户进行了分类，将所有用户分成了“日峰型”、“无峰谷型”、“W型”型和“V型”四类。下面会先

列出在售电利润和用户满意度的权值在某一时值时，实施售电套餐后的二十四小时分时电价和实施分时电价前后用户的日负荷曲线变化，以此体现用户对价格激励的响应和售电套餐对用户日负荷曲线的改变效果，并对比实施售电套餐前后用户用电成本的改变。之后通过改变权值，求出每一类用户其利润和满意度的帕累托前沿，以供售电公司参考。

在本算例的情景中，所有用户在实施售电套餐之前，其电价是统一且全天不变的，此处本文参考广东省投资促进局发布的《全省平均电价一览表》中商业用电的价格<sup>[15]</sup>，将其设定为85.6分/千瓦时。售电公司从批发市场购电的价格为模拟成熟电力市场中，批发市场电价峰时升高，谷时降低的规律，参考《广州市一般工商业峰谷电价表》中用电分类为“不满1千伏”的用户的合计电价，其具体取值如表4所示。

表4 售电公司购电价格

Table 4 electricity purchase price of power selling companies

峰谷时段	高峰	平段	低谷
购电电价(分/千瓦时)	114	70	36

所有用户每时段的自弹性系数K取一个固定的值-0.38，对于用户的满意度利润系数 $\varphi_{sp}$ 以及用户每时段用电量的最大值 $Q_t^{\max}$ 和最小值 $Q_t^{\min}$ 直接取值。此处用户各时段的用电量上下变化范围取一恒定值。这些量的取值原则为在基本符合现实情况的基础上，使算例的模拟效果更为明显。每个用户具体取值如表5所示。

表5 算例用户每时刻用电量变化范围和 $\varphi_{sp}$ 的取值

Table 5 variation range of power consumption per hour and value of  $\varphi_{sp}$

用户类型	用电量变化范围(千瓦时)	$\varphi_{sp}$ (分)
日峰型	$\pm 200000$	200000000
无峰谷型	$\pm 10000000$	700000000
W型	$\pm 350000$	300000000
V型	$\pm 200000$	300000000

##### 4.2.1 “日峰型”用户

首先对“日峰型”用户的典型日负荷曲线

进行售电套餐优化设计。图 13 和图 14 分别为针对“日峰型”用户的售电套餐全天二十四小时的分时电价和实施售电套餐前后该类用户日负荷曲线变化。此处 $\omega_{pro}$ 和 $\omega_s$ 相等均为 0.5。

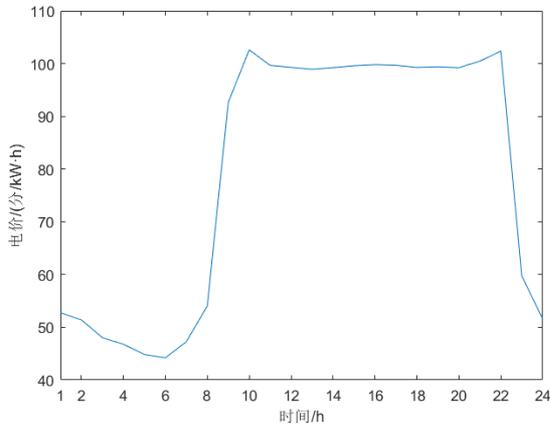


图 13 “日峰型”用户电价

Fig.13 "Daily peak" tariff

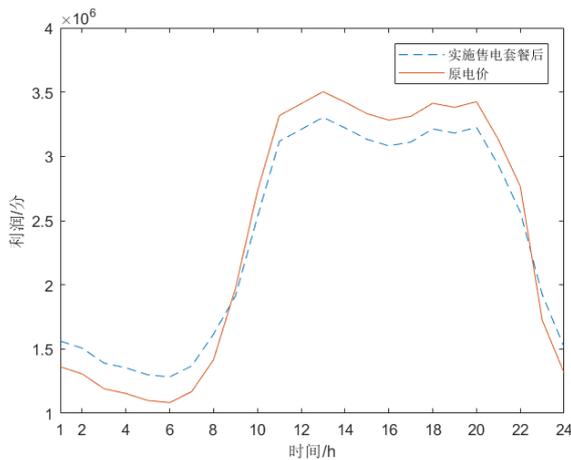


图 14 “日峰型”用户日负荷曲线变化

Fig.14 Variation of daily load curve of "daily peak type" users

从图 13 和 14 可以看出，在峰时段和平时段电价升高后，用户的用电量较原先有了明显的下降；相反在谷时段电价较低时，用户用电量较原先又出现升高，符合需求响应中电力用户对价格的响应。说明本文中模型设计是较为合理的，针对“日峰型”用户有明显的削峰填谷效果。图 15 为“日峰型”用户其利润和满意度的帕累托前沿。

从图 15 可以看出，售电公司利润与用户的满意度呈负相关，这是很明显的，当用户的

电价降低时，售电商的短期利润一定会减少。且可以发现，当满意度过高时，售电商的利润开始下降甚至为负数，在售电公司的实际经营中，这种情况应当极力避免，因此用户满意度与利润之间的权衡还是十分重要的。

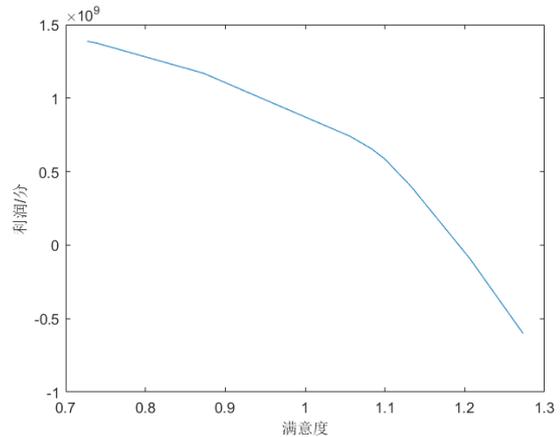


图 15 “日峰型”用户帕累托前沿

Fig.15 Pareto frontier of "day peak" users

#### 4.2.2 “无峰谷型”用户

之后对“无峰谷型”用户进行售电套餐设计。图 16 和图 17 为针对“无峰谷型”用户设计的售电套餐其分时电价情况和实施售电套餐前后用户的日负荷曲线。此处 $\omega_{pro}$ 和 $\omega_s$ 相等均为 0.5。

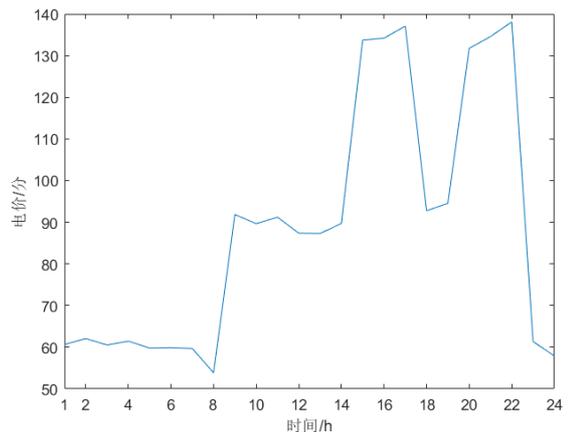


图 16 “无峰谷型”用户电价

Fig.16 "No peak and valley" tariff

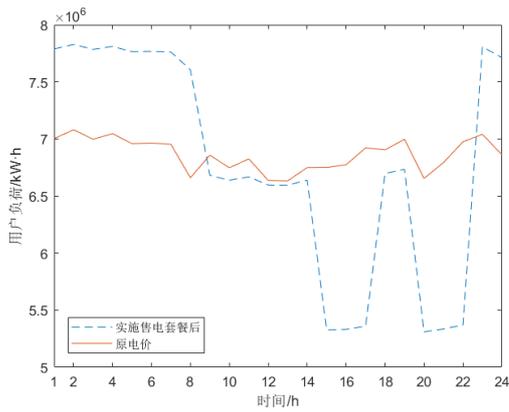


图 17 “无峰谷型”用户日负荷曲线变化

**Fig.17 Variation of daily load curve of "no peak valley" customers**

从图中可以看出，与对“日峰型”用户不同的是，针对于“无峰谷型”的用户的售电套餐其峰、谷、平三个时段的电价维持在三个不同的水平程度，从而将用户负荷曲线改造为类似于“W型”用户，而“日峰型”用户的套餐电价基本只区分了峰谷两种电价，平时被纳入了峰时考虑，其实施电价套餐后负荷曲线的大致形状没有变化。图 18 为“无峰谷型”用户其利润和满意度的帕累托前沿。

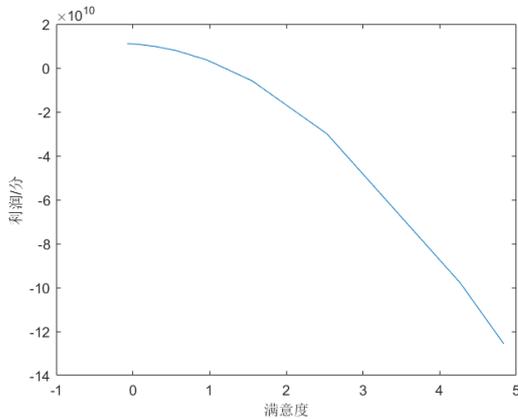


图 18 “无峰谷型”用户帕累托前沿

**Fig.18 Pareto frontier of "no peak valley" users peak valley" customers**

从图中可以看出，曲线的大部分点其利润都已经低于 0，而用户满意度的值远大于 1，因此售电公司在具体采用此图进行参考时，可以仅截取利润大于零的部分曲线。

#### 4.2.3 “W 型”和“V 型”用户

之后对“W 型”和“V 型”用户进行售

电套餐设计。因为其负荷曲线形态相仿，在此将其列在一起进行分析。图 3-7 到图 3-10 分为针对“W 型”和“V 型”用户设计的售电套餐其分时电价情况和实施售电套餐前后用户的日负荷曲线。此处  $\omega_{pro} = 0.4$  而  $\omega_s = 0.6$ 。

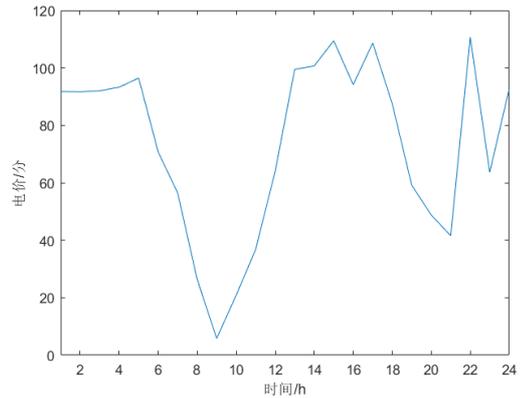


图 19 “W 型”用户电价

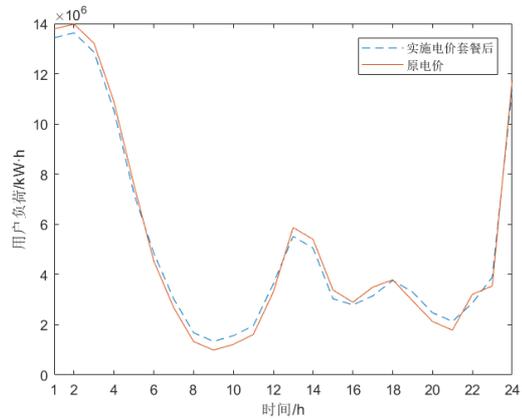
**Fig.19 "W type" tariff**


图 20 “W 型”用户日负荷曲线变化

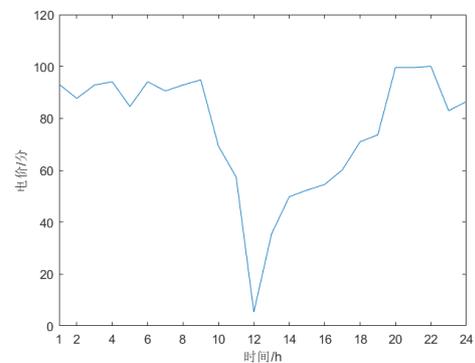
**Fig.20 Variation of daily load curve of "W type" users**


图 21 “V 型”用户电价

**Fig.21 "V-type" consumer price**

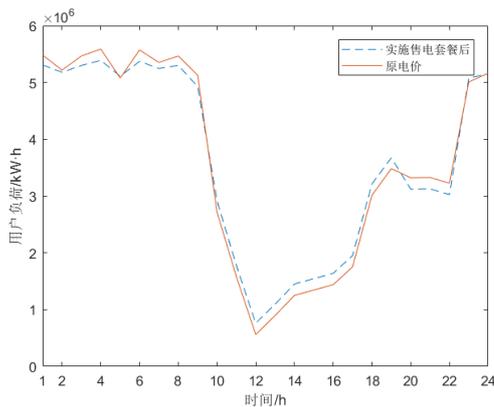


图 22 “W 型”用户日负荷曲线变化

Fig.22 Variation of daily load curve of "W type" users

可以看出，售电套餐的实施对于这些“夜峰日谷”的用户同样会起到削峰填谷的作用，但是其效果并不明显，因为这些用户原先的用电模式已经非常符合售电商的利益，削峰填谷只是为了在某些时段降低电价以使用户满意度上升，博得其好感的手段。图 23 和图 24 为“W 型”和“V 型”用户利润与满意度的帕累托前沿。

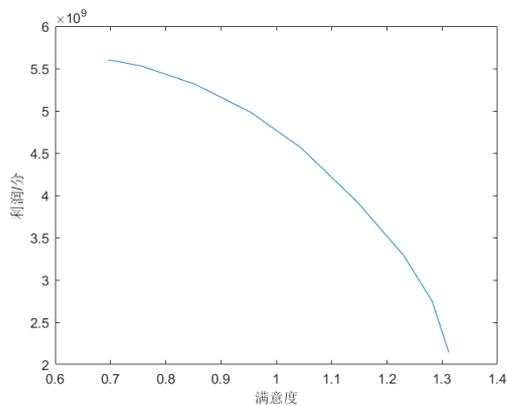


图 23 “W 型”用户帕累托前沿

Fig.23 Pareto frontier of "W type" users

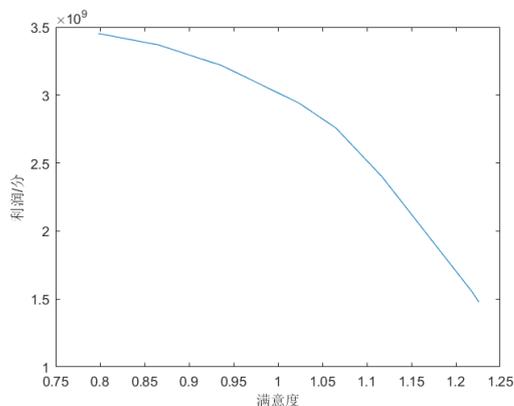


图 24 “V 型”用户帕累托前沿

Fig.24 Pareto frontier of "V" users

两类用户的帕累托前沿并无明显特点，同样是体现售电商利润与用户满意度之间的量化关系。

#### 4.2.4 用户对比

首先对所有用户在实施售电套餐前后的用电成本进行对比。在表 6 中列出了四种售电套餐实施前后每一类用户的用电成本。

表 6 用户成本对比  
Table 6 user cost comparison

用户类别	原始成本 (分)	当前成本 (分)
日峰型	4920100000	4903900000
无峰谷型	14171000000	13781000000
W 型	10777000000	10598000000
V 型	7433600000	7317600000

从表中可以看出，所有类别的用户在实施了售电套餐之后，其用电成本都较原先有所降低，这与售电套餐的设计初衷相符。

对四类用户售电套餐电价进行分析，可以发现“日峰型”和“无峰谷型”用户的套餐电价可以明显看出不同时段的区别，在实际操作时可以将不同时段相似电价进行整合以提高用户的接受程度。而“W 型”和“V 型”用户的套餐电价比较波动，所以在实际推行时可能要采取一些其他手段使用户接受。之后对四类用户日负荷曲线改变进行分析，可以发现售电套餐对于每一类用户都能实现削峰填谷效果，但与“日峰型”和“无峰谷型”用户日峰填谷以增加利润相比，另外两种用户的削峰填谷只是售电公司降低电价以获得用户满意度上升的手段。

## 5 结论

售电套餐的设计是售电公司运营过程中的重要问题，本文从售电公司利润和满意度的角度出发，尝试提出了一种基于用户用电特征的售电套餐策略。通过对实际用户的负荷数据进行实例计算，可以发现聚类算法在根据用电特征对用户进行分类的应用中效果显著，基于聚类算法，算例数据中的所有用户被分成了四类，且每一类用户的负荷特性指标之间皆存在显著差异，更证明了该分类方法的有效性。

进一步,在四类用户的基础上,使用本文的优化策略对每一类用户进行了售电套餐设计,并对售电套餐的实施成果进行了模拟计算,结果表明该售电套餐优化策略可以在考虑利润和用户满意度的同时,降低用户的用电成本。本文还得出每一类套餐其利润与用户满意度的帕累托前沿,供供电公司参考。

## 参 考 文 献

- [1] 何青,高效,张文月,陈国平,何永秀.美国德州电力市场零售电价套餐体系及启示[J].供用电,2018,35(12):50-55.
- [2] 张小平,李佳宁,付灏.英国电力零售市场的改革与挑战[J].电力系统自动化,2016,40(11):10-16.
- [3] 何永秀,陈奋开,叶钰童,刘培良,高效.澳大利亚零售市场电价套餐的经验及启示[J].智慧电力,2019,47(07):19-23+28.
- [4] 孙毅,顾玮,李彬,崔灿,孙辰军,郑爱霞.面向售电侧改革的用户分层聚类与套餐推荐方法[J].电网技术,2018,42(02):447-454.
- [5] Mu Qitian,Gao Yajing,Yang Yongchun,Liang Haifeng.Design of Power Supply Package for Electricity Sales Companies Considering User Side Energy Storage Configuration[J].Energies,2019,12(17):3219.
- [6] 喻小宝,谭忠富,屈高强.基于电力客户评估的差异化电价套餐研究[J].中国电力,2020,53(02):9-19.
- [7] 窦迅,王俊,邵平,郭艳敏,张鑫.考虑用户贡献度的售电商购售电策略[J].电网技术,2019,43(08):2752-2760.
- [8] 侯佳萱,林振智,杨莉,丁一,栾开宁,杨斌.面向需求侧主动响应的工商业用户电力套餐优化设计[J].电力系统自动化,2018,42(24):11-19.
- [9] 刘思,李林芝,吴浩,孙维真,傅旭华,叶承晋,黄民翔.基于特性指标降维的日负荷曲线聚类分析[J].电网技术,2016,40(03):797-803.
- [10] 焦哲.新电改条件下负荷特性及零售电价套餐设计分析[D].北京:华北电力大学,2019.
- [11] 赵岩,李磊,刘俊勇,刘友波,胥威汀,侯贺飞,姚珺玉.上海电网需求侧负荷模式的组合识别模型[J].电网技术,2010,34(01):145-151.
- [12] 祝志超,吴定会,杨朝辉,杨宇辉.计及分时电价的用户需求响应研究综述[J].智慧工厂,2019(12):46-50+62.
- [13] 王媛,周明.居民用户对分时电价的响应潜力评价方法[J].电力建设,2017,38(11):48-54.
- [14] 丁伟,袁家海,胡兆光.基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J].电力系统自动化,2005(20):14-18.
- [15] 广东省投资促进局.全省平均电价一览表[EB/OL].[http://www.gd.gov.cn/gdywdt/tzfw/tzcb/content/pos\\_t\\_3014737.html](http://www.gd.gov.cn/gdywdt/tzfw/tzcb/content/pos_t_3014737.html),2020-06-12.

收稿日期: 2020-10-21

作者简介:

喻洁(1975年-),女,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统经济运行、优化调度、需求侧管理、电力市场、虚拟发电厂等, yujie@seu.edu.cn