

# 计及时滞指标综合灵敏度的 用户电价响应模式划分方法

姚珺玉<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 刘友波<sup>1</sup>, 杨旭昕<sup>1</sup>, 唐勇<sup>2</sup>

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065; 2. 四川省电力公司, 四川省 成都市 610061)

## An Approach to Divide Customer Price Response Modes Taking Comprehensive Sensitivity of the Time Delay Index Into Account

YAO Jun-yu<sup>1</sup>, LIU Jun-yong<sup>1</sup>, LIU You-bo<sup>1</sup>, YANG Xu-xin<sup>1</sup>, TANG Yong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Based on the elastic coefficient matrix of electricity quantity and price, a concept of time-delay of electricity price response and its mathematical model are proposed. The stable state of time-delay response is researched and the time-delay index is quantized. According to elastic coefficient of demand response, the demand response of 335 customers is analyzed; by use of fuzzy C-means clustering, the customers possessing common price response characteristics are classified, and the effectiveness of classification results is verified by customer load curves at different days after the price adjustment. Combining with elastic coefficient of demand response and using comprehensive sensitivity matrix, multi customers are analyzed and the customers with common response characteristics are classified, thus the dimensionality of response matrix is enlarged, and the response information of customers is expanded. Calculation example results show that the proposed time-delay index can find up these customers rapidly which respond to price adjustment, and give the assessment on time-delay characteristics of customers. The proposed method can be applied in reducing uncertainty of response, modifying selling and purchasing scheme of electricity, modifying dispatching modes and trading plan.

**KEY WORDS:** demand response; time-delay; customer classification; elastic matrix; fuzzy C-means clustering; sensitivity

**摘要:** 基于电量电价弹性矩阵, 提出了电价响应时滞性的概念与数学模型, 研究了时滞响应的稳定状态, 量化了时滞性指标。结合需求响应弹性系数, 对 335 个用户进行需求响应

分析, 采用模糊 C 均值聚类方法, 将具有共同电价响应特征的用户分类, 并用不同用户时间断面负荷曲线验证了该分类结果的有效性。结合需求响应弹性系数, 利用综合灵敏度矩阵对多个用户进行分析, 将具有共同响应特征的用户分类, 扩大了响应矩阵的维度, 扩展了用户的响应信息。算例结果表明, 该时滞性指标能快速找出对电价调整有响应的用户, 并对用户响应时滞性能做出评价。该方法对减小响应不确定性, 修正购售电计划、调度方式、交易计划有积极意义。

**关键词:** 需求响应; 时滞性; 用户分类; 弹性矩阵; 模糊 C 均值聚类; 灵敏度

## 0 引言

峰谷分时电价是通过价格信号和激励机制引导用户采取合理用电方式, 从而减小高峰负荷需求, 以相对低的费用实现供需平衡。文献[1-2]考虑用户满意度, 提出了分时电价优化模型。文献[3-4]研究了峰谷分时电价下购电成本的模型。文献[5-6]利用电力电量弹性矩阵综合分析了用户电价响应。文献[7]在实行大用户直购情况下, 提出了一种综合考虑分时电价、电能质量和直购电量 3 个因素的固定成本分摊方法, 建立了平衡 3 方利益的分时电价模型。文献[8-9]用聚类方法对负荷曲线进行了分类与综合。

负荷曲线分类是将同一电网不同负荷点以及不同时间段中负荷特征相似的负荷归并为一类, 其中最关键的是负荷特征的选择和分类<sup>[9]</sup>。价格联动等政策的实施将使电价机制不断合理化, 电价调整带来的用户响应是对价格调整的重要反馈。对不同用户, 价格不同可能使用户用电方式改变, 从而不符合其

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217905)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217905).

原有的负荷曲线特性。有效测量和量化用户分时电价用电特性,如电量和时间的响应,对电网公司制定购电和售电计划有重要意义。电力市场中,期货市场为电力工业提供了很好的风险管理工具,规避了现货市场电价高度波动带来的风险。研究表明,期货市场与现货市场还存在领先、滞后关系<sup>[10]</sup>。若能对用户响应时间特性做出评估,发掘期货市场价格功能,现货市场交易风险将大幅降低。在智能电网中,用户与电网公司间的互动交流尤为重要,用户各类响应特性的量化可为此提供技术支持。

本文将提出需求响应时滞性概念与数学模型,通过对响应时滞进行量化分析,确定响应稳定状态。结合电价弹性系数矩阵,利用综合灵敏度矩阵对各类用户进行特征分析,通过聚类分析对用户类别进行划分。

## 1 需求响应时滞性

需求响应(demand response, DR)定义为用户在正常消费方式下,根据市场电价变化或通过激励报酬机制降低高峰电价,或在可靠性受到威胁时,改变其固有用电模式的行为<sup>[11]</sup>。目前,我国峰谷电价政策的目标是“削峰填谷”,即降低电网高峰负荷差及用电成本,优化负荷曲线。由于电网公司承担了实施峰谷分时电价的大部分成本,实施峰谷分时电价虽可缓解电网压力,但可能使电网公司售电收入有所减少<sup>[3]</sup>。

图1(a)为某地区峰谷分时电价的划分标准,其中纵坐标1、2、3分别代表谷时段、平时段、峰时段。图1(b)为某市2006年建材、电气、医药和非工业行业的标幺化日负荷曲线。图1(b)所示典型日负荷曲线与图1(a)中分时电价时段划分的契合度各不相同。

某市2006年4月30日开始调整电价,选取建材行业负荷曲线,拉大峰平谷比例,以实现“削峰填谷”。该建筑行业各月标幺化型日负荷曲线见图2。图2表明,电价调整后,分时电价响应效果具有明显的延时性。因此,在峰谷分时电价实施前期,电网可能盈利,此时获得的利润为先期剩余利润。然而,当用户作出完全反应后,许多省网均出现了利润下降或亏损。因此,在长期核算方面,峰谷分时电价实际上存在较大的风险问题。上述问题都是由于在制定峰谷分时电价政策时,没有充分考虑到峰谷分时电价并非实时电价,其特有的用户响

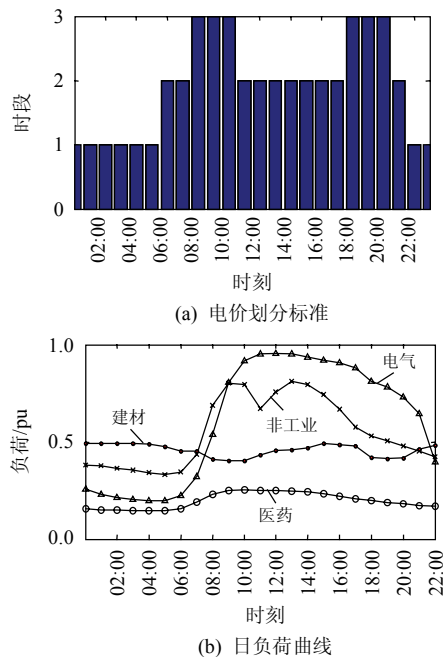


图1 某地区分时电价划分标准和行业标幺化日负荷曲线  
Fig. 1 The division standard of time of use electricity price and normalized load curves of industries in a certain area

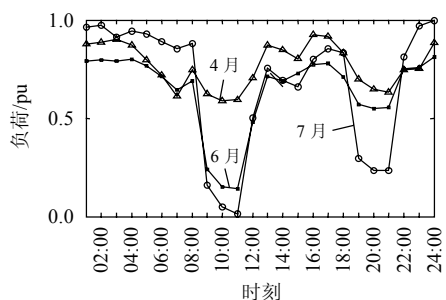


图2 某建筑行业各月标幺化日负荷曲线  
Fig. 2 Normalize load curves of a building materials industry

应延时性和电价策略本身存在的欠弹性造成的。

基于此,本文做如下假设:1)允许用户能根据公布电价改变生产计划;2)暂不考虑各用户电量自然增长率。

需求响应模式主要由需求弹性矩阵量化<sup>[12]</sup>。电能不能大量存储,因此难以随着市场价格实时改变电力需求<sup>[13]</sup>。影响需求响应的因素较多,如用户对电价响应时间等。基于上述考虑,本文提出根据用户电价不同响应特性划分电价。根据用户用电特征,本文提出时滞性(time delay)概念,即电价变化后用户对电价变化的延时响应效应。当响应达到恒定状态时,可对用户响应的时滞性进行量化。

## 2 按需求响应划分用户类别

### 2.1 异常值的辨别修正

选用拉依达准则( $3\sigma$ 准则)对样本异常值进行修

正。设测量数据服从正态分布，在测量数据 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 中，若残差 $|v_k| = |\lambda_{n,i} - \bar{\lambda}_{n,i}| > 3\sigma_i$ ，则判断该数据为异常数据。式(1)~(4)给出了判断数据失真及修正数据的过程<sup>[12]</sup>：

$$\bar{\lambda}_{n,i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \lambda_{n,i}, \quad i \text{ 为自然数} \quad (1)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\lambda_{n,i} - \bar{\lambda}_{n,i})^2 \quad (2)$$

$$|v_k| = |\lambda_{n,i} - \bar{\lambda}_{n,i}| > 3\sigma_i \quad (3)$$

$$\lambda_{n,i} = (\varphi_1 \sum \lambda_{n\pm 1,i} + \varphi_2 \sum \lambda_{n,i}^{1,2}) / 2 + \varphi_3 \bar{\lambda}_{n,i} \quad (4)$$

式(1)~(4)中： $x_{n,i}$ 为第 $n$ 天第 $i$ 点数据； $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 为权重， $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1$ ； $\lambda_{n\pm 1,i}$ 为 $\lambda_{n,i}$ 附近2个横向负荷点； $\lambda_{n,i}^{1,2}$ 为离 $\lambda_{n,i}$ 最近的2个相似日负荷点。

平滑后的序列为

$$\lambda'_{n,i} = \frac{1}{3} \sum_{j=-1}^1 \lambda_{n,i+j}, \quad i = 1 \sim 96 \quad (5)$$

若满足如下失真条件：

$$|\lambda_{n,i} - \lambda'_{n,i}| > \delta \lambda'_{n,i} \quad (6)$$

则

$$\lambda_{n,i} = (\varphi'_1 \sum \lambda_{n,i\pm 1} + \varphi'_2 \sum \lambda_{n,i\pm 2}) / 2 \quad (7)$$

式中： $\lambda_{n,i\pm 2}$ 、 $\lambda_{n,i\pm 1}$ 为第 $n$ 天第 $i\pm 2$ 、 $i\pm 1$ 个负荷数据点； $\delta$ 为失真阈值，取0.09~0.18； $\varphi'_1$ 和 $\varphi'_2$ 为参数， $\varphi'_1 + \varphi'_2 = 1$ 。

## 2.2 电量电价弹性矩阵的建立

采用电量电价弹性系数矩阵量化用户电价响应。电价的自弹性系数 $\varepsilon_{ii,k}$ 表示用户 $k$ 对峰谷分时电价的单时段响应，交叉弹性系数 $\varepsilon_{ij,k}$ 表示用户 $k$ 对峰谷分时电价的多时段响应<sup>[12]</sup>，2者的表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_{ii,k} = \frac{\partial Q_{i,k} / Q_{i,k}}{\partial P_{i,k} / P_{i,k}} \\ \varepsilon_{ij,k} = \frac{\partial Q_{i,k} / Q_{i,k}}{\partial P_{j,k} / P_{j,k}} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $i, j \in \{f, p, g\}$ ， $f$ 、 $p$ 、 $g$ 分别为峰、平、谷时段， $Q$ 和 $P$ 分别为用户电量和电价，特征变量序列为 $1 \times 9$ 阶矩阵，即 $\mathbf{E}_{t,k} = [\varepsilon_{ff,k}, \varepsilon_{pp,k}, \varepsilon_{gg,k}, \varepsilon_{fp,k}, \varepsilon_{fg,k}, \varepsilon_{pf,k}, \varepsilon_{pg,k}, \varepsilon_{gf,k}, \varepsilon_{gp,k}]$ 。

## 2.3 时滞指标和综合灵敏度的计算

由于用户需求响应与系统时段划分、峰谷价差及平时段基价等有关，本文考虑用转移的峰谷电量比例来衡量响应程度。用户对电价变化响应的时间越短，转移电量幅度越大，时滞性越小。在量化用户移峰填谷效应中，为避免负荷突变引起的循环终

止误判，引入连续 $d$ 天的负荷变化量均值。时滞指标的具体计算过程如下：

1) 进行日负荷96点采集与异常值处理。

2) 设 $d$ 为步长，计算第 $k$ 个用户调价后第1天到第 $i+d$ 天峰平谷电量 $Q_{t,i}^k$ ，其中 $t \in \{f, p, g\}$ 。

3) 将各时段电量值 $Q_{t,i}^k$ 标么化。以调价前的 $h$ 天的平均日电量为基准值 $Q_t^k$ ，则

$$Q_{t,i}^{*k} = Q_{t,i}^k / Q_t^k \quad (9)$$

4) 设连续 $d$ 天各时段电量均值为 $D_{t,i}^{*k}$ ，本文取 $d=3$ ，则

$$D_{t,i}^{*k} = (Q_{t,i}^{*k} + Q_{t,i+1}^{*k} + \dots + Q_{t,i+d-1}^{*k}) / d \quad (10)$$

5) 计算用户 $k$ 时段 $i$ 的峰平谷电量变化量 $\Delta D_{t,i}^{*k}$ ，即

$$\Delta D_{t,i}^{*k} = D_{t,i+1}^{*k} - D_{t,i}^{*k} \quad (11)$$

6) 计算用户 $k$ 第 $i$ 天移峰填谷量与电价变化的比例 $\Delta D_i^{*k}$ ，即

$$\Delta D_i^{*k} = (\Delta D_{p,i}^{*k} + \Delta D_{g,i}^{*k} - \Delta D_{f,i}^{*k}) / (\Delta P / P) \quad (12)$$

7) 计算是否达到稳定状态。记录此时的 $i$ ，令 $a=i$ ，测算移峰填谷效应标准差 $S_i^k$ ，即

$$S_i^k = \sqrt{\sum_{i=1}^a (\Delta D_i^{*k} - \hat{\Delta D}_i^{*k})^2 / a} \quad (13)$$

$$S_i^k > S_{i-1}^k > S_{i-2}^k \quad (14)$$

$$S_i^k > S_{i+1}^k > S_{i+2}^k \quad (15)$$

式(13)中 $\hat{\Delta D}_i^{*k}$ 为前 $i$ 次计算 $\Delta D_i^{*k}$ 的平均值。

若满足式(14)(15)，则进入稳定状态的判断，通过式(16)可判断是否达到稳定状态，若未达到稳定状态，则返回步骤2)，此后计算无须通过式(14)(15)判断。若满足式(15)，则停止计算，此时记 $i=n$ 。设 $\varepsilon$ 为计算精度，其值可任意设定。当符合如下终止条件时，此时状态为响应稳定状态：

$$|S_i^k - S_{i-1}^k| < \varepsilon \quad (16)$$

8) 计算带权重的时滞指标 $w_k$ 。权重集 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 符合正态分布。时滞指标由下式可得：

$$w_k = \alpha_1 \Delta D_1^{*k} + \alpha_2 \Delta D_2^{*k} + \dots + \alpha_n \Delta D_n^{*k} \quad (17)$$

$\{\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_n^*\}$ 为符合正态分布的数据，对其进行归一化处理，将数列按由大到小的顺序排列为 $\{\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n\}$ 。权重 $\alpha_m$ 的表达式为

$$\alpha_m = \frac{|\alpha'_m|}{\sqrt{\alpha_1'^2 + \alpha_2'^2 + \dots + \alpha_n'^2}}, \quad m \in n \quad (18)$$

9) 返回步骤1)，按以上步骤继续计算其它用户的时滞指标，直到得到所有用户的时滞指标，即

形成列向量  $W_k=[w_1 w_2 \dots w_k]^T$ 。

10)  $W_k$  与  $E_{t,k}$  形成综合灵敏度矩阵  $M_{k \times 10}$ 。

11) 对时滞指标进行评价。指标评价标准见表 1。表 1 中:  $Z_1 \sim Z_5$  表示时滞指标评价价值范围;  $x_1 \sim x_5$  表示弹性系数评价价值范围。

表 1 指标评价标准

Tab. 1 Evaluation standard of indices

评价标准	很小	较小	较大	很大
时滞性指标	$Z_1 \sim Z_2$	$Z_2 \sim Z_3$	$Z_3 \sim Z_4$	$Z_4 \sim Z_5$
弹性系数	$x_1 \sim x_2$	$x_2 \sim x_3$	$x_3 \sim x_4$	$x_4 \sim x_5$

电价响应时滞性指标计算流程如图 3 所示。算法在 Matlab7.0 平台实现。

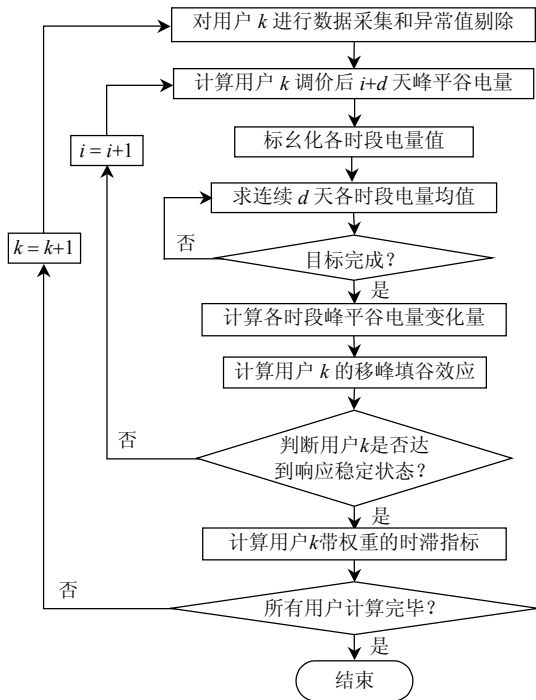


图 3 时滞性指标的计算流程

Fig. 3 Calculation flow chart of time delay indices

### 2.4 需求响应稳定状态的判断

在计算时滞指标过程中, 本文用式(12)判断用户是否完成对电价的响应。若存在移峰填谷效应, 则在计算初期由于不存在响应或响应不稳定, 标准差呈趋于零或逐渐增大的趋势。在计算后期, 响应达到稳定, 则标准差逐渐减小。通过式(14)(15)判断响应是否趋于恒定。然后通过式(16)判断响应是否完成。当达到响应稳定状态时,  $n$  即为响应达到稳定所需的时间。

### 2.5 指定目标下 FCM 聚类算法

为进一步挖掘用户特征, 找出具有相同用电特征的用户类。FCM 聚类方法是一种在已知聚类数的情况下, 利用隶属度和迭代算法将有限的数据集分别聚类的方法。设给定样本为  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 聚类

数为  $C$ , 满足如下目标函数:

$$\min J = \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^N U_{ik}^{(l)} D_{ik}^2 \quad (19)$$

其中

$$Z_i^{(l)} = \frac{\sum_{k=1}^n U_{ik}^{(l)m} X_k}{\sum_{k=1}^n U_{ik}^{(l)m}}, \quad i = 1 \sim C \quad (20)$$

$$U_{ik}^{(l+1)} = 1 / \sum_{j=1}^C (D_{ik} / D_{jk})^{2/(m-1)} \quad (21)$$

式中:  $D_{ik}$  为第  $k$  个样本到第  $i$  类的中心欧式距离,  $D_{ik} = \|X_k - Z_i^{(l)}\|$ ;  $Z_i^{(l)}$  为第  $i$  类的中心第  $l$  次迭代结果;  $U_{ik}^{(l)}$  为第  $k$  个样本在第  $i$  类中的隶属度第  $l$  次迭代结果, 且满足

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^C U_{ik}^{(l)} = 1, \quad \forall k \\ n > \sum_{i=1}^C U_{ik}^{(l)} > 0, \quad \forall i \end{cases} \quad (22)$$

式中  $m$  为隶属度的加权系数。给定初始化参数  $C$  和  $m$ , 计算第 1 类中心初始值  $Z_1^{(0)}$ 。通过式(20)(21)不断迭代, 直到满足  $\|U_{ik}^{(l+1)} - U_{ik}^{(l)}\| < \gamma$  为止, 其中  $\gamma$  为给定值。根据当前的聚类中心和隶属度即可得到样本的聚类结果<sup>[14]</sup>。

## 3 算例结果与分析

### 3.1 样本数据与评价标准

某市 2006 年 6 月 30 日起调整电价, 价格时段划分如表 1 所示。采集该市 2006 年 14 个行业共计 335 个用户日负荷数据。以调价前 30 d 平均峰平谷电量为基准电量, 时滞性指标评价标准见表 2。

表 2 时滞性指标评价标准

Tab. 2 Evaluation standard of the time delay index

评价标准	很长	较长	较短	很短
时滞性指标值	0~3	3~7	7~20	20 以上
平均时长/d	38~50	26~37	13~26	1~12

采用调整电价前后各 30 d 平均电量测算需求弹性矩阵电量。在时滞指标计算中, 时滞值为负, 表明用户无响应, 因此可快速筛选有响应的用户。时滞指标值越大, 表明用户响应效果越好, 延时效果较小。对时滞值为正的用户进行模糊 C 均值聚类分析, 其中  $C$  设定为 10。

本文的弹性系数指标评价标准见表 3。

表 3 弹性系数指标评价标准

Tab. 3 Evaluation standard of the elasticity coefficient index

评价标准	很小	较小	较大	很大
弹性系数绝对值	0~1	2~5	5~10	10 以上

3.2 样本聚类结果和指标评价结果

图 4 为化工行业某化学研究院、轻工行业某电器公司、轻工行业某纸厂和汽车行业某锻造公司 4 种不同类别用户的综合灵敏度矩阵  $M_{1 \times 10}$ 。自弹性系数(白色柱图)、交叉弹性系数(黑色柱图)和时滞性指标(火柴棒图)在不同类别间均表现出较大差异。图 4(c)表示了响应较理想的用户。图 4(c)中自弹性系数为负,交叉弹性系数为正,表明该用户对电价调整具有较好的移峰填谷效应。同时,由图 4(c)中火柴棒图可知,该类用户的时滞指标值为 7.7196,响应时间较短,该类用户对电价调整较敏感。

对电价调整灵敏度低的用户,可通过增加激励调动用户响应积极性。针对不同类用户制定符合自

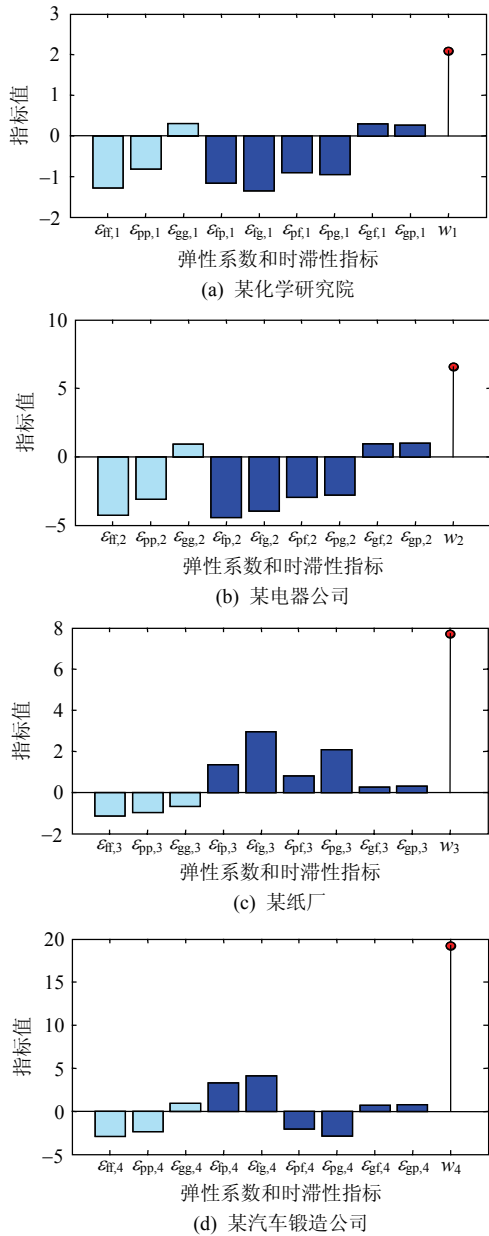


图 4 4 类用户的响应指标  
Fig. 4 Response indices of four type of users

身用电特性的电价政策,使用户对的峰谷电价获得最大利益,电网公司也能由此分类评估其获利空间,及时调整电价政策,更好地实现移峰填谷。

图 5 中 1~10 依次为综合灵敏度矩阵  $M_{1 \times 10}$  中的元素,其直观表现同类用户和不同类别用户的响应特征。图 5 原点到外边界的范围为-15~15。由图 5 可知:同类用户指标图形较一致,时滞指标均在 5~15 范围内,弹性系数相近;不同类用户图形分布不均,弹性系数和时滞指标分布在各段。

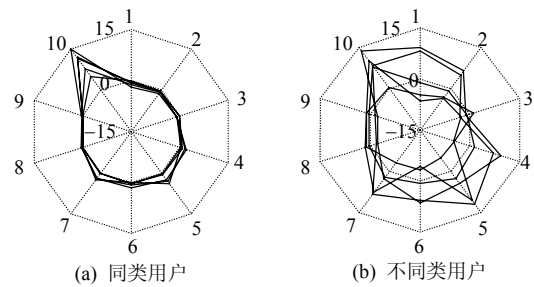


图 5 同类用户和不同类用户的指标形态  
Fig. 5 Indice distribution of the similar type and different type of users

分析 10 类用户中 4 类特性差异较大的典型用户评价指标,如表 4 所示。第 1 类用户主要由电气、轻工和汽车用户组成,由于其用电成本比重较小,第 1 类用户的响应时间较短。第 2 类用户的生产方式不易调整,综合灵敏度较低,需求弹性很小,响应时间也较长,主要分布在非工业、化工、轻工、汽车和仪表行业。第 3 类用户主要为轻工行业用户,平均自弹性系数为-7.337 0,交叉弹性系数为 7.945 5,时滞指标为 16.887 6,此类用户的电费占生产成本比重大,对电价综合灵敏度较高。第 4 类用户弹性系数较大,但响应时间较长,电价调整反映不灵敏,主要分布在非工业、轻工和汽车行业。差异较大的第 1 类与第 4 类用户的弹性系数和时滞性指标如表 5 所示。

表 4 典型用户指标评价结果

Tab. 4 Index evaluation results of typical users

用户类别	自弹性系数	交叉弹性系数	时滞性指标值
第 1 类	很小	很小	很短
第 2 类	较小	较小	很长
第 3 类	较大	较大	较短
第 4 类	较大	较小	较长

表 5 第 1 类与第 4 类用户的弹性系数和时滞性指标  
Tab. 5 Elasticity coefficient and time delay indices of the first and fourth users

用户类别	自弹性系数	交叉弹性系数	时滞性指标值
第 1 类	-0.613 9	0.482 8	20.829 7
第 4 类	-6.932 9	3.123 6	4.799 0

第1类和第4类用户都有轻工和汽车行业，但响应特性存在较大差异，平均延迟天数分别为12和37d。为验证综合灵敏度分类的有效性，对第1类和第4类用户的负荷曲线进行分析，如图6所示。由图6(a)可知，调价后12d负荷曲线和调价后37d负荷曲线拟合较好，相对于调价前负荷曲线，上述2条曲线的平时段和谷时段的负荷明显增加。由图6(b)可知，调价前负荷曲线与调价后12d负荷曲线拟合较好，相对于上述2条曲线，调价后37d负荷曲线平时段和谷时段的负荷明显增加。

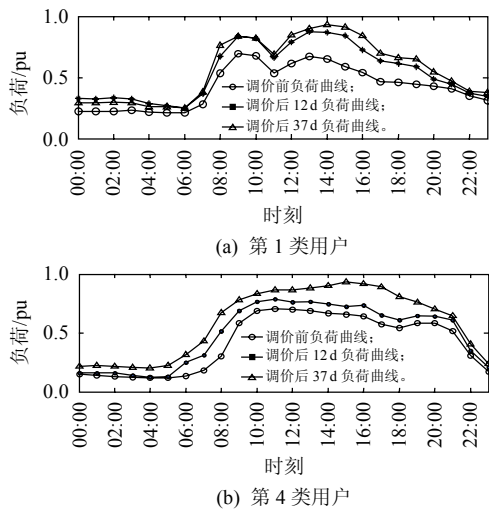


图6 第1类和第4类用户各时间断面负荷曲线  
Fig. 6 Load curve of the first and fourth type users in each time section

典型用户各时段电量比较见表6。由表6可知，2类用户调价后均出现移峰填谷现象，峰谷比和峰平比明显下降。由图6和表6可知，调价后37d负荷峰谷比和峰平比相对于调价后12d时变化不大，即响应趋于稳定。

表6 典型用户峰谷和峰平电量比  
Tab. 6 Ratio of peak-to-valley and peak-to-flat electric quantity of typical users

时间	第1类		第4类	
	$Q_v/Q_g$	$Q_f/Q_p$	$Q_v/Q_g$	$Q_f/Q_p$
调价前	1.636 4	0.652 8	2.612 4	0.601 8
调价后12d	1.568 4	0.623 2	2.708 7	0.608 9
调价后37d	1.581 9	0.619 0	2.368 1	0.596 7

根据上述用户类别横向比较和时间断面纵向比较结果可知：计及时滞指标综合灵敏度分类的用户类别间存在响应时滞性差异；响应稳定时间对电价响应弹性系数有一定的修正作用，根据这种修正作用可进一步修正各类用户短中长期交易计划。

#### 4 结论

1) 传统的基于需求响应的用户响应分析方法

已不能满足对电价调整的研究要求。本文提出了计及电价响应时滞性的数学模型，将用户响应与时间效应联系起来，结合需求响应弹性系数，利用综合灵敏度矩阵对多个用户进行分析，将具有共同响应特征的用户分类，扩大了响应矩阵维度，扩展了用户响应信息，为需求响应的评价提供了更客观的依据，为用户分类提供了新方法。

2) 本文的研究减小了负荷和用户对电价响应的不确定性，对购售电计划、调度方式、交易计划的修正有积极意义。

3) 未来的研究重点将涉及更多的影响用户需求响应分类的因素，可根据不同类用户制定不同分时电价售电方案，以使电价制定更加科学合理。

#### 参考文献

- [1] 李晖, 康重庆, 夏清. 考虑用户满意度的需求侧管理价格决策模型[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 1-6.  
Li Hui, Kang Chongqing, Xia Qing. Price based decision making for demand side management considering customer satisfaction index[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 1-6(in Chinese).
- [2] 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, 29(20): 10-14.  
Ding Wei, Yuan Jiahai, Hu Zhaoguang. Time-of-use price decision model considering users reaction and satisfaction index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 10-14(in Chinese).
- [3] 唐捷, 任震, 高志华, 等. 峰谷分时电价的成本效益分析模型及其应用[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 61-66.  
Tang Jie, Ren Zhen, Gao Zhihua, et al. Cost-benefit analysis model and its application of peak-valley time-of-use electricity price[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 61-66(in Chinese).
- [4] 段登伟, 刘俊勇, 吴集光. 计及风险的配电公司最优分时零售电价模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 8-12.  
Duan Dengwei, Liu Junyong, Wu Jiguang. Optimal time of use retail pricing models for distribution utility with risk management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 8-12(in Chinese).
- [5] Daniel S K, Goran S, Pariya C, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 612-617.
- [6] David A K, Li Y Z. Effect of inter-temporal on the real time pricing of electricity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 44-52(in Chinese).
- [7] Zhou Ming, Li Gengyin, Zheng Yanan, et al. An integrated approach on allocating the fixed wheeling cost of large consumers considering time-of-use pricing and power quality[J]. 2007 IEEE Lausanne Power Technology, 2007(7): 920-925.
- [8] 鞠平, 陈谦, 熊传平, 等. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 6-9.  
Ju Ping, Chen Qian, Xiong Chuanping, et al. Load clustering and synthetic modeling based on daily load curves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 6-9(in Chinese).
- [9] 李培强, 李欣然, 陈辉华, 等. 基于模糊聚类的电力负荷特性的

- 分类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 73-78.
- Li Peiqiang, Li Xinran, Chen Huihua, et al. The characteristics classification and synthesis of power load based on fuzzy clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 73-78(in Chinese).
- [10] 刘思东, 杨洪明, 童小娇. 电力期货市场的价格功能发现[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 57-61.
- Liu Sidong, Yang Hongming, Tong Xiaojiao. Price discovery function of electricity futures market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 57-61(in Chinese).
- [11] Albadi M H, El-Saadany E F. Demand response in electricity markets: an overview[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 933-940.
- [12] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫, 等. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 16-19.
- Qin Zhenfang, Yue Shunmin, Yu Yixin, et al. Price elasticity matrix of demand current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 16-19(in Chinese).
- [13] 聂江洪, 曾伟民. 在电力市场中引入电力需求弹性的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 84-89.
- Nie Jianghong, Zeng Weimin. Research on introducing on electricity demand elasticity into electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 84-89(in Chinese).
- [14] 唐杰明, 刘俊勇, 刘友波. 基于最优 FCM 聚类和最小二乘支持向量回归的短期电力负荷预测[J]. 现代电力, 2008, 25(2): 76-81.
- Tang Jieming, Liu Junyong, Liu Youbo. Short-term load forecasting based on least square support vector regression and fuzzy C-mean clustering with the best class number[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(2): 76-81(in Chinese).



姚珺玉

收稿日期: 2009-08-16。

作者简介:

姚珺玉(1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场与动态电价响应分析, E-mail: yyjyy@foxmail.com;

刘俊勇(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化系统等方面的研究, E-mail: starword@mail.

sc.cninfo.net;

刘友波(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统经济运行, E-mail: mailtobo@163.com。

(责任编辑 杜宁)