

基于累积前景理论的智能电网多零售商服务评价

王涛, 高岩

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 基于累积前景理论, 引入奖惩罚劣 $[-1, 1]$ 算子和灰关联决策系数对选取多零售商评价指标进行处理, 得到新的前景价值函数, 计算出各零售商的综合前景值进行排序, 并与期望效用值下的排序进行比较, 算例表明综合前景值更能反映出用户的真实评价。用户更喜欢在一个服务合同中提供多种措施的零售商。给予用户一定的消费者激励可以提高他们对零售商服务评价的满意度, 并且能够弥补技术不完善和服务态度欠缺给用户带来的损失。

关键词: 智能电网; 累积前景理论; 实时定价; 评价

中图分类号: F 224.3

文献标志码: A

Multi-retailer Service Evaluation of Smart Grid Based on Cumulative Prospect Theory

WANG Tao, GAO Yan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the cumulative prospect theory, a reward punishment $[-1, 1]$ operator and a grey correlation decision coefficient were introduced to deal with the selection of multiple retailer evaluation indexes, and a new prospect value function was obtained. The comprehensive prospect value of each retailer was calculated to rank and compare with that under the expected utility value. The example shows that the comprehensive prospect value can better reflect the real evaluation of users. Users prefer retailers who offer multiple measures in a service contract. A certain consumer incentive can improve the satisfaction of service evaluation of retailers, and make up for the loss of users caused by imperfect technology and lack of service attitude.

Keywords: smart grid; cumulative prospect theory; real-time pricing; evaluation

当前, 智能电网下电力零售市场正逐渐从一至两个售电商的垄断经营向多个零售商共存的现实过渡, 这种转变为电力用户在选择接入电力和服务时提供方便, 基于需求侧的智能电网管理正逐渐成为研究的主要方向^[1]。需求侧管理措施包括

基于价格的需求响应和基于激励的需求响应, 基于价格的需求响应是需求响应机制的关键手段之一, 其中最理想的是实时定价^[2]。

实时定价 (real-time pricing, RTP) 是指电力零售商根据用户的需求实时地制定电力价格, 是电

收稿日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11171221)

第一作者: 王涛 (1995-), 男, 硕士研究生。研究方向: 经济系统优化。E-mail: 547156967@qq.com

通信作者: 高岩 (1962-), 男, 教授。研究方向: 智能电网定价机制、非光滑优化。E-mail: gaoyan@usst.edu.cn

力销售中某一瞬间发生的费用，是零售商根据用户的需求对用户提供的—种电力价格服务。与现行电价相比，实时定价具有如下优点：一是反映各个时刻的电能供求信息，引导供给侧合理地进行电力生产，零售商合理地采购电能；二是电价的高低取决于用户当前对电力总需求的大小，帮助用户规划自己的用电时间。RTP通过灵活高效的价格信号变化，能够较好地实现削峰填谷、负荷转移和降低用户用电费用的目标^[3-4]，同时也能够促进节能减排，是一种有效的需求侧管理手段。

目前最新的实时定价相关研究工作主要关注影响和改进实时电价实施效果的相关因素。文献[5]研究了具有多类资源多类用户的智能电网RTP问题，指出零售商在作出有效的市场决策时需要考虑用户因素。文献[6]讨论了实时定价中的网络拥塞问题，指出该问题会导致用户体验下降。文献[7]考虑了RTP实施中的信息延迟给电力用户带来的影响，指出信息延迟会增加用户的用电成本。文献[8-10]指出，在实时定价中采取消费者激励因素可以提高用户参与率和满意度。以上文献从不同角度研究了智能电网下实施RTP的影响因素，同时也指出了当前在售电商和电力用户间仍然不能实现较好的信息互动和较高质量的电力服务。

虽然许多研究分析了实时定价以及其他需求侧管理措施对负荷控制和消费者行为转变的影响，但是，很少有研究能够量化消费者如何评价这些措施所带来的服务，即如何评价零售商为用户提供的电力服务。在现有的相关文献中，Paetz等^[11]通过论述可变税率、智能计量、智能家电和家庭自动化的相关指标，研究了消费者对智能家居能源管理系统的看法。Kaufmann等^[12]调查了瑞士电力用户对智能电表服务的看法，为进一步深入分析智能能源管理系统服务提供了可能。文献[13]认为未来能源服务合同的设计需要对用户透明并反映用户的个人偏好。文献[14]在前人研究的基础上，进一步通过量化服务指标方式对智能能源管理服务进行了研究，指出家庭消费者在面对电力服务合同上存在偏好异质性，不同的策略会影响用户的服务评价。

本文通过量化的方式研究电力服务质量问题，所使用的方法侧重于消费者在面对各种服务指标时行为选择的问题，并且在选取指标上结合了相关影响RTP运行效果的因素。与传统评价决策

体系中所使用的期望效用理论相比，累积前景理论^[15]具有如下优势：一是放弃了理性人假设；二是承认决策者在作出决策时不具有完全的理解和分析能力，引入了形式效应和权重函数来衡量这种误差；三是认为决策者在面对损失和收益时的主观感受是不同的，个人失去的效用大于得到的效用；四是认为决策者在衡量各方案时会引入一个参考点，从而在内心形成对方案的相对损益^[16-17]。

1 多零售商评价指标体系

本文从智能电网实时定价出发，将多零售商对电力用户提供服务合同中所含的价格因素、技术因素、激励因素和服务态度这4个方面，分别表示为实时价格 P ，互动时的信息延迟程度 D ，激励消费者的激励因素 R 和下一阶段价格公布的时间 T ，构建智能电网多零售商服务评价模型。

a. 价格因素。考虑RTP本身的影响，需要在多零售商服务评价模型中考虑价格因素，用实时电价 P 来表示价格因素。

b. 技术因素。互动时的信息延迟程度会影响用户的用电体验^[6-7]，各零售商的技术先进程度不一，会导致用户和零售商之间的互动产生时滞并且可能会使用户在选择售电商时出现失误，增加了互动成本和购电费用。用 D 来表示互动时的信息延迟给用户带来的成本增加值， $D = lg$ 。 l 为信息延迟时长，min； g 为每分钟延迟的成本增加值，元/min。

c. 激励因素。在开放的电力市场中，零售商出于吸引客户或者其他原因，根据用户的消费模式以及偏好对用户采用多种激励机制^[8-10]。比较常见的激励措施是零售商根据用户的电力消费量对用户进行激励以维持并赢得更多用户。 $R = \theta Q$ ， θ 为每单位用电量的补贴价， Q 为用户的用电量。

d. 服务态度。服务态度也是销售电能过程中—个重要的变量。通过实时定价，零售商在—天中循环滚动报价，即在给定的时间内（如1 h）制定电价并提前公布（如提前20 min），用户则利用能量管理控制器（energy management controller, EMC）^[18]处理相应的数据信息并作出决策。市场中零售商公布价格的时间越早，说明售电商们的服务态度越好，用户在选择下一阶段售电商的信息量也就越大。 T 表示价格公布时间点（ T_1 ）与上一阶段电价

开始时间点(T_0)之间的时间(如将一天划分为24个时间段,12:00—13:00的实时电价在11:45公布,则 $T=45\text{ min}$)。用 T 衡量服务态度,且价格公布时间离下一阶段开始时间越近,成本越高。

2 累积前景理论

根据累积前景理论^[15]的定义,决策者对备选方案的感知是相对值,而不再是绝对值。假设 x_k 为决策者的潜在收益,一个风险型评估对象在 n 种可能的风险情景下,对应 n 个潜在收益 $x_1, x_2, \dots, x_n$,由大到小进行排序 $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_l \geq 0 \geq x_{l+1} \geq \dots \geq x_n$,其中, x_k 表示排在第 k 位的潜在收益, $k = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。因此,累积前景值通常被定义为

$$V = \sum_{i=1}^n \pi_i^+ v(x_i) + \sum_{i=1}^n \pi_i^- v(x_i) \quad (1)$$

式中: V 为累积前景值; π_i^+, π_i^- 为累计决策权重函数; $v(x_i)$ 为价值函数。

价值函数的具体表达形式为

$$v(x) = \begin{cases} (x)^\alpha, & x > 0 \\ -\lambda(-x)^\beta, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 表示目标决策值与所选参考点的值的差; α, β ($0 < \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$)为衡量敏感性程度指数, α, β 越大,表示人们对风险越敏感; λ 表示损失规避系数,且 $\lambda > 1$ 总成立,反映个体对于损失更加敏感的事实。

当决策者面临收益时,决策权重函数为

$$\pi^+(w_j) = \frac{(w_j)^\gamma}{[(w_j)^\gamma + (1 - w_j)^\gamma]^{1/\gamma}} \quad (3)$$

当决策者面临损失时,决策权重函数为

$$\pi^-(w_j) = \frac{(w_j)^\delta}{[(w_j)^\delta + (1 - w_j)^\delta]^{1/\delta}} \quad (4)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的权重; γ, δ 为决定权重函数的曲率,对应的值越小,则权重函数弯曲程度越大,体现出高估小概率、低估中概率和大概率事件的特性。一般来说^[15], $\gamma = 0.61, \delta = 0.69$ 。

3 基于累积前景理论的零售商服务评价

3.1 问题描述

假设市场中 m 个零售商的集合为 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$,评价指标权重向量为 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$,设第 i 个零售商提供第 j 种服务的指标值为 x_{ij} ,构成一个 m 行

n 列的评价矩阵 $\mathbf{A} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。通过标准化处理,可以得到电力零售商标准化评价矩阵。在此基础上,利用累积前景理论可以得到不同零售商的累积前景值,根据对不同零售商累积前景值的分析比较,可以得到最优零售商所采取的措施。

3.2 评价步骤

现介绍评价步骤。

步骤1 数据处理。

考虑到不同类型的数据有不同的单位,为了消除量纲的影响,使得数据具有可比性,借鉴奖优罚劣的思想^[17],利用 $[-1, 1]$ 线性变换算子,将所用到的数据进行无量纲处理。

$$z_j = \frac{1}{m} \sum_i x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: z_j 为零售商第 j 种服务的无量纲值。

设规范决策矩阵为 $(r_{ij})_{m \times n}$, r_{ij} 为规范决策矩阵的元素。若 r_{ij} 为效益型指标,则

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - z_j}{\max_j \left\{ \max_j (x_{ij}) - z_j, z_j - \min_j (x_{ij}) \right\}} \quad (6)$$

若 r_{ij} 为成本型指标,则

$$r_{ij} = \frac{z_j - x_{ij}}{\max_j \left\{ \max_j (x_{ij}) - z_j, z_j - \min_j (x_{ij}) \right\}} \quad (7)$$

步骤2 确定参照点。

结合TOPSIS方法的思想,以正理想方案 s^+ 和负理想方案 s^- 作为参照点。

$r_j^+ = \max \{r_{ij} | 1 \leq i \leq m\}$, $r_j^- = \min \{r_{ij} | 1 \leq i \leq m\}$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

$$s^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+\}, \quad s^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-\} \quad (8)$$

式中: r_j^+ 为效益型规范化指标值; r_j^- 为成本型规范化指标值。

由多指标灰关联分析决策方法可以得到第 k 种方案与正负理想方案关于指标值的关联系数 $\xi_{ij}^\pm$ ^[17]分别为

$$\begin{cases} \xi_{ij}^+ = \frac{\min_i \left\{ \min_j \left| r_{ij} - r_j^+ \right| \right\} + \rho \max_i \left\{ \max_j \left| r_{ij} - r_j^+ \right| \right\}}{\left| r_{ij} - r_j^+ \right| + \rho \max_i \left\{ \max_j \left| r_{ij} - r_j^+ \right| \right\}} \\ \xi_{ij}^- = \frac{\min_i \left\{ \min_j \left| r_{ij} - r_j^- \right| \right\} + \rho \max_i \left\{ \max_j \left| r_{ij} - r_j^- \right| \right\}}{\left| r_{ij} - r_j^- \right| + \rho \max_i \left\{ \max_j \left| r_{ij} - r_j^- \right| \right\}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： ρ 为相关系数。

一般选取 $\rho = 0.5$ ，此时，各零售商的价值函数可转化为

$$v(r_{ij}) = \begin{cases} (1 - \xi_{ij}^-)^{\alpha}, & \text{以负理想方案为参考点} \\ -\lambda(-(\xi_{ij}^+ - 1))^{\beta}, & \text{以正理想方案为参考点} \end{cases} \quad (10)$$

步骤3 求取指标权重。

利用前景值最大化求取各指标的权重 $w = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ ，再根据决策权重函数求得各指标的决策权重，已有的研究表明^[15]， $\alpha = \beta = 0.88$ ， $\lambda = 2.25$ 。

步骤4 求取各零售商的综合前景值。

在上述步骤的基础上，结合式(1)计算出各零售商的综合前景值，并按照大小进行排序。

3.3 累积前景理论与效用理论的比较

根据文献[5,8]，衡量电网用户满意度大小常常采用效用理论方法，常用的用户效用函数是一个关于用电量的凹函数，具有边际收益递减特征。因此，选择二次函数作为效用函数，具体形式为

$$U(Q, \omega) = \omega Q - \frac{\eta}{2}(Q)^2 \quad (11)$$

式中： Q 为用户用电量； ω, η 表示随用户不同而不同的参数。

可得用户的社会福利函数^[5]

$$F = U(Q, \omega) - PQ - lg - f(T) + \theta Q \quad (12)$$

式中： $f(T)$ 代表零售商服务态度给用户带来的值，用户可依据自身社会福利最大化来选择零售商为自己提供服务。

比较综合前景值和依据效用理论得到的社会福利函数，可以得到如下几方面的信息：a. 社会福利函数为多项式的加减，没有考虑用户的风险心理因素，即式(12)中表示损失的 lg ， PQ 和 $f(T)$ 这3项没有体现出用户面临损失时的态度； θQ 也没有体现出用户面临收益时的态度。实际上用户在面临损失和收益时的主观感受是不同的，故式(12)遗漏了重要的主观心理信息。b. 社会福利函数在处理不同量纲数据时必须要把不同量纲的值通过某个方程式或者其他式子转化为同一量纲才能计算。但是，综合前景值可以通过对数据前期标准化的处理，避免引入其他的方程式来逐项统一量纲，简化了不同项的计算过程。c. 效用理论的基本假设比较严格(如理性人假设)，在实际生活中应用显得过于理论化；但是，综合前景值的

计算中放弃了这些比较严格的假设公理，使得理论与事实联系更为紧密。

4 算例分析

在发达的电力市场中已经证明了不同级零售商共存的事实，假设市场中有一个用户在某时段内需要用10 kW·h的电，现在市场中有6个不同的电力零售商为用户提供电力服务，且零售商不全提供用电激励，令 $g = 0.01$ 元/min， $\theta = 0.002$ 元/(kW·h)，或 $\theta = 0.001$ 元/(kW·h)，或 $\theta = 0.0015$ 元/(kW·h)； $f(T) = \frac{U(Q, \omega)}{T_2 - (T_1 - T_0)}$ ， T_2 为下时段电价开始时间(如下时段为12:00—13:00，则 T_2 为12:00)；信息延迟时长矩阵 $l = [1.5, 3, 0.3, 1.2, 0.5]^T$ 。各个零售商的评价指标值如表1所示。各指标权重取值范围为 $0.1 \leq w_1 \leq 0.2$ ， $0.1 \leq w_2 \leq 0.2$ ， $0.2 \leq w_3 \leq 0.5$ ， $0.1 \leq w_4 \leq 0.2$ 。

表1 零售商服务评价指标值

Tab.1 Retailer service evaluation index value

项目	P	D	R	T
H_1	0.35	0.015	0.015	50
H_2	0.32	0.030	0.020	55
H_3	0.38	0.003	0	40
H_4	0.37	0.010	0.010	45
H_5	0.34	0.020	0.020	53
H_6	0.36	0.005	0	42

4.1 用户综合前景值

现利用 $[-1, 1]$ 算子对评价指标值进行标准化，得到服务评价标准化矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.091 & -0.074 & 0.389 & -0.333 \\ 1 & -1 & 0.852 & -1 \\ -0.818 & 0.667 & -1 & 1 \\ -0.515 & 0.235 & -0.074 & 0.333 \\ 0.394 & -0.383 & 0.852 & -0.733 \\ -0.212 & 0.543 & -1 & 0.733 \end{bmatrix}$$

根据步骤1中的式(8)，得到零售商的正负理想方案分别为

$$s^+ = (1, 0.667, 0.852, 1)$$
$$s^- = (-0.818, -1, -1, -1)$$

由式(9)计算出各零售商正负理想方案的系数矩阵为

$$\xi^+ = \begin{bmatrix} 0.524 & 0.574 & 0.684 & 0.429 \\ 1 & 0.375 & 1 & 0.333 \\ 0.355 & 1 & 0.351 & 1 \\ 0.398 & 0.698 & 0.519 & 0.600 \\ 0.623 & 0.488 & 1 & 0.366 \\ 0.452 & 0.890 & 0.351 & 0.789 \end{bmatrix}, \quad \xi^- = \begin{bmatrix} 0.524 & 0.519 & 0.419 & 0.600 \\ 0.355 & 1 & 0.351 & 1 \\ 1 & 0.375 & 1 & 0.333 \\ 0.767 & 0.447 & 0.519 & 0.429 \\ 0.452 & 0.618 & 0.351 & 0.789 \\ 0.623 & 0.393 & 1 & 0.366 \end{bmatrix}$$

于是, 可以通过式(10)计算出各零售商的正负前景矩阵为

$$v^+ = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.53 & 0.62 & 0.45 \\ 0.68 & 0 & 0.68 & 0 \\ 0 & 0.66 & 0 & 0.70 \\ 0.28 & 0.59 & 0.53 & 0.61 \\ 0.59 & 0.43 & 0.68 & 0.25 \\ 0.42 & 0.64 & 0 & 0.67 \end{bmatrix}, \quad v^- = \begin{bmatrix} -1.17 & -1.06 & -0.82 & -1.37 \\ 0 & -1.49 & 0 & -1.58 \\ -1.53 & 0 & -1.54 & 0 \\ -1.44 & -0.78 & -1.18 & -1.00 \\ -0.95 & -1.25 & 0 & -1.51 \\ -1.33 & -0.32 & -1.54 & -0.57 \end{bmatrix}$$

以各零售商的综合前景值最大化为目标建立优化模型

$$\begin{aligned} \max v = & \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 v_{ij}^+ \pi^+(w_j) + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 v_{ij}^- \pi^-(w_j) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} 0.1 \leq w_1 \leq 0.2, & 0.1 \leq w_2 \leq 0.2 \\ 0.2 \leq w_3 \leq 0.5, & 0.1 \leq w_4 \leq 0.2 \\ \sum_{j=1}^4 w_j = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

使用 Matlab 软件求解, 得到各零售商评价指标的最优权重为 $w^*=(0.2, 0.2, 0.5, 0.1)$ 。将最优权重 w^* 带入下式:

$$v_i^* = \sum_{j=1}^4 v_{ij}^+ \pi^+(w_j^*) + \sum_{j=1}^4 v_{ij}^- \pi^-(w_j^*)$$

得到 $v_1=-0.56, v_2=-0.19, v_3=-0.79, v_4=-0.71, v_5=-0.22, v_6=-0.82$ 。

由结果可知, $H_2 > H_5 > H_1 > H_4 > H_3 > H_6$, 从排序结果来看, 当某个零售商提供的服务指标 x_{ij} 都不为 0 时, 该零售商更受用户欢迎, 即表明用户欢迎零售商提供多种服务。

4.2 用户社会福利函数值

由式(11)和式(12)可分别计算出用户的用电效用值和用户的社会福利函数值。根据社会福利值的大小, 用户可以选择哪个零售商提供服务。将表 1 数据代入式(12), $F(H_i)=U(Q,\omega)-p_iQ-gl_i-f(T_i)+\theta_iQ$, 令 $\omega=2,\eta=0.05$, 则 $H_1=12.25, H_2=10.79, H_3=12.82, H_4=12.63, H_5=11.6, H_6=12.92$ 。很显然, $H_6 > H_3 > H_4 > H_1 > H_5 > H_2$ 。若现在假设各零售商价格相同, 可以得到 $H_3 > H_6 > H_4 > H_1 > H_5 > H_2$ 。

4.3 结果

通过对比综合前景值和社会福利函数值, 可以得到如下结果: a. 在社会福利函数值中, 通过

比较价格相同和价格不同时 的社会福利值, 可得价格因素、技术因素和激励因素在社会福利函数中的作用很小的结论, 说明社会福利函数会偏向一个对其影响很大的变量而忽视其他变量的作用, 这种倾向性是因为社会福利函数采用的是简单多项式加减运算, 得出的结论难以令人信服。b. 在综合前景值中, 各零售商服务评价的综合前景值由价值函数和权重函数计算出, 引入权重函数不仅使得计算的结果更有说服力, 而且还显示出各指标值在用户心理上的重要程度。c. 通过比较两种方法下的零售商服务评价排序, 得到在评价零售商服务时激励因素发挥了显著的作用。

5 结 论

基于累积前景理论, 考虑决策者的心理风险因素对决策结果的影响, 将多指标灰关联决策方法引入模型中, 利用奖优罚劣的 $[-1, 1]$ 线性变换算子, 得到了符合人们思维方式的正负理想方案。在此基础上, 根据累积前景理论和灰关联决策系数重新定义前景价值函数, 构建综合前景值最大化的优化模型, 并且引入效用理论, 比较这两种情况下服务排序的不同结果。算例表明: 累积前景理论在服务评价方面更有优势; 零售商提供种类多样的服务措施更能吸引用户; 激励因素对提高用户对零售商服务评价很有帮助, 甚至在一定程度上可以弥补技术和服务态度不足给用户带来的不良感受。

参考文献:

[1] JIN T D, MECHEHOUL M. Ordering electricity via internet and its potentials for smart grid systems[J]. IEEE

- [Transactions on Smart Grid](#), 2010, 1(3): 302–310.
- [2] ZHANG K, MAO Y M, LENG S P, et al. Incentive-driven energy trading in the smart grid[J]. [IEEE Access](#), 2016, 4: 1243–1257.
- [3] SONG M, AMELIN M. Price-maker bidding in day-ahead electricity market for a retailer with flexible demands[J]. [IEEE Transactions on Power Systems](#), 2018, 33(2): 1948–1958.
- [4] FAN Z, KULKARNI P, GORMUS S, et al. Smart grid communications: overview of research challenges, solutions, and standardization activities[J]. [IEEE Communications Surveys & Tutorials](#), 2013, 15(1): 21–38.
- [5] 朱红波, 高岩, 后勇, 等. 马尔可夫过程下多类用户智能电网实时电价[J]. [系统工程理论与实践](#), 2018, 38(3): 807–816.
- [6] IBARS C, NAVARRO M, GIUPPONI L. Distributed demand management in smart grid with a congestion game[C]//Proceedings of 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg: IEEE, 2010: 495–500.
- [7] 高岩. 带有边际效用非递减用户的智能电网实时电价定价方法[J]. [工业工程与管理](#), 2018, 23(1): 10–13.
- [8] 代业明, 高岩, 朱红波, 等. 考虑消费者激励因素的智能电网多零售商多用户实时定价策略[J]. [工业工程](#), 2017, 20(1): 12–19.
- [9] LI Z C, WANG S R, ZHENG X J, et al. Dynamic demand response using customer coupons considering multiple load aggregators to simultaneously achieve efficiency and fairness[J]. [IEEE Transactions on Smart Grid](#), 2018, 9(4): 3112–3121.
- [10] HU Q R, LI F X, FANG X, et al. A framework of residential demand aggregation with financial incentives[J]. [IEEE Transactions on Smart Grid](#), 2018, 9(1): 497–505.
- [11] PAETZ A G, DÜTSCHKE E, FICHTNER W. Smart homes as a means to sustainable energy consumption: a study of consumer perceptions[J]. [Journal of Consumer Policy](#), 2012, 35(1): 23–41.
- [12] KAUFMANN S, KÜNZEL K, LOOCK M. Customer value of smart metering: explorative evidence from a choice-based conjoint study in Switzerland[J]. [Energy Policy](#), 2013, 53: 229–239.
- [13] DÜTSCHKE E, PAETZ A G. Dynamic electricity pricing—which programs do consumers prefer?[J]. [Energy Policy](#), 2013, 59: 226–234.
- [14] RICHTER L L, POLLITT M G. Which smart electricity service contracts will consumers accept? The demand for compensation in a platform market[J]. [Energy Economics](#), 2018, 72: 436–450.
- [15] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. [Journal of Risk and Uncertainty](#), 1992, 5(4): 297–323.
- [16] 施海燕, 施放. 期望效用理论与前景理论之比较[J]. [统计与决策](#), 2007(6): 22–24.
- [17] 王正新, 党耀国, 裴玲玲, 等. 基于累积前景理论的多指标灰关联决策方法[J]. [控制与决策](#), 2010, 25(2): 232–236.
- [18] MAHARJAN S, ZHU Q Y, ZHANG Y, et al. Demand response management in the smart grid in a large population regime[J]. [IEEE Transactions on Smart Grid](#), 2016, 7(1): 189–199.

(编辑: 石 瑛)