

基于区块链隐私保护的智能电网实时定价

李军祥, 张同辉, 屈德强, 潘龙博

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 当前智能电网实时定价机制未考虑隐私信息泄露对用电量和电价的影响, 且忽略了供电商与用户之间的利益均衡。为兼顾隐私保护和供需双方的利益均衡, 将区块链隐私信息保护的机制融入到智能电网实时电价的策略之中, 依据隐私敏感程度的不同, 对用户进行分类, 并将区块链的应用程度进行量化, 建立基于区块链应用程度的社会福利最大化模型。利用拉格朗日对偶理论和投影梯度法求出最优用电量、最优供电量和最优电价。数值仿真表明: 区块链的去中心化性质、混币机制和链下加密技术, 能有效保护供需双方的隐私信息, 降低供电成本和用电成本, 提高供电商的利润和福利。

关键词: 智能电网; 区块链; 隐私保护; 利益均衡; 实时定价; 拉格朗日对偶

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A

Real-time pricing based on blockchain privacy protection of smart grid

LI Junxiang, ZHANG Tonghui, QU Deqiang, PAN Longbo

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

Abstract: Currently, the real-time pricing mechanism of smart grid does not consider the impact of privacy information disclosure on power consumption and electricity price, and ignores the balance of interests between power suppliers and users. In order to take into account privacy protection and the balance of interests between supply and demand sides, the blockchain privacy information protection mechanism was integrated into the real-time electricity price strategy of smart grid. By classifying users and quantifying the application degree of blockchain, a social welfare maximization model was established on the basis of the application degree of blockchain. The optimal electricity consumption, supply and price were obtained by using the Lagrangian dual theory and the projected gradient method. Numerical simulations showed that the decentralized nature, currency mixing mechanism and off-chain encryption technology of the blockchain can effectively protect the privacy information of both supply and demand, reduce the cost of power supply and electricity consumption, and improve the profit and welfare of the power supplier.

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72071130); 国家自然科学基金匹配项目 (2020KJFZ034); 上海理工大学大学生创新训练计划项目 (XJ2021165)

第一作者: 李军祥 (1971-), 男, 教授。研究方向: 管理科学与工程。E-mail: lijx@usst.edu.cn

Keywords: *smart grid; blockchain; privacy protection; balance of interests; real-time pricing; Lagrangian duality*

随着中国电力能源结构的改变以及人们对用电需求的增加, 电网供电压力越来越大, 传统的电力系统已无法满足日益增长的电力需求, 建立一个统一的智能电网是未来中国电网的发展方向^[1-2]。

在智能电网中, 智能电表可以实时记录和收集用户大量的用电数据, 并将这些数据发送到中央管理机构。这些数据包含了用户的用电设备和日常起居等信息, 如果这些数据被不当利用, 则会使用户面临隐私泄露的风险^[3]。根据互联网信息服务投诉平台公布的 2021 年 1 月至 8 月投诉情况显示, 5 月投诉平台共收到投诉 170 132 件, 其中, 互联网企业 132 330 件、基础电信企业 37 802 件。在这些投诉中, 个人信息保护类投诉 22 128 件, 占比 13%^[4]。美国 NIST 的安全威胁分析报告中指出, 对智能电表收集到的用户用电数据进行分析, 会有用户隐私信息泄露风险^[5]。通过对大量的用户用电细粒度数据进行分析, 可以得到用户的日常活动轨迹。2021 年 6 月, 《中华人民共和国数据安全法》经十三届全国人大常委会第二十九次会议表决通过, 于 2021 年 9 月 1 日起正式实施。该法案的颁布, 标志着我国在数据安全领域有法可依, 也为各行业数据安全提供了监管依据, 同时也从一定程度上体现了国家对于保护个人和组织隐私、维护国家主权及安全和发展的高度重视。未来, 个人隐私及信息安全必然会受到社会的普遍关注, 也将在一定程度上影响到各行业的发展。因此, 面向智能电表的用电数据隐私保护问题引起了广泛关注。随着消费者对信息隐私关注的增强, 供电商具备的隐私保护功能必然会对供电商间的竞争产生影响, 成为供电商定价策略必须考虑的重要因素之一^[6]。用户的隐私信息是否保护得当是其购电过程中所需考虑的环节, 而区块链技术作为一种新型去中心化的数据库技术对于解决隐私信息保护问题提供了良好的技术支持^[7]。

区块链本质上是一个拥有去中心化、应用分布式数据储存、实施点对点传输、形成共识机制和使用加密算法等机制的数据库^[8-10]。它的特点主要表现为很难被篡改和盗取信息。当交易达成时, 交易双方根据预先约定好的智能合约, 进行资金转移^[11]。区块链技术的应用可以有效调节供需双方的福利以及用电策略^[12], 并且可以保护供

需双方的隐私信息, 给智能电网的发展带来了活力^[13]。不同用户对隐私敏感程度不同, 区块链的应用程度影响着隐私信息的保护程度, 进而影响用户的用电量, 供电商根据用户的用电量实时更新电价。所以, 基于区块链隐私保护以及用户的用电量与电价之间的交互值得深入研究。

文献 [14-16] 研究表明, 根据用户细粒度的用电数据可以推断用户的行为信息, 如用户的睡眠周期和用户是否在家。如果这些隐私数据被恶意的分子或商家获得, 不但会对用户的生活产生不良影响, 而且会让犯罪分子有机可乘, 对用户的利益和安全造成严重损害。文献 [17] 通过验证企业隐私条例的有效性实验发现, 被消费者认为“更安全”或者“更值得信任”的企业将更具有竞争优势。文献 [18] 提出了一种基于区块链和联邦学习的边缘计算隐私保护方法, 能够抵抗 30% 的中毒攻击, 并且能以较高的模型准确率实现隐私保护。文献 [19] 使用区块链技术、智能合约和匿名消息流, 保证了微电网交易的隐私性和安全性。文献 [20] 提出基于联盟链技术的电力交易方法来提高交易的透明性。文献 [21] 以用户购电效用最大化为目标, 建立了不同风险喜好的用户选择负荷最优套期保值比例的决策模型。文献 [22] 通过合作博弈的方式建立多能互补发电策略模型来满足用户的全部电力需求, 以增加电力供应商的利润。文献 [23] 提出了一种可再生能源定价方案, 以尽量减少用户的总电费。当前的研究对于隐私信息的保护停留在改进电网的交易机制方面, 并没有把它量化到电量与电价的交互过程中。另一方面大多数都以供电商成本的最小化或者用户的用电福利最大化进行实时定价, 以达到社会福利最大化, 忽略了供电商和用户之间的利益均衡。

区块链技术去中心化特性, 取代了中央管理机构, 能够有效保护隐私信息。本文旨在研究区块链应用程度不同情况下, 多种类型用户的智能电网实时定价策略。基于此, 改进了用户的效用函数和供电商成本函数, 将区块链应用程度量化在供需双方的模型中。通过区块链交易平台的实时定价策略, 提高了供电商利润和用户福利, 进而实现社会福利最大化及供需平衡。

1 基于区块链的智能电网主体模型

不同类型用户对隐私信息的敏感程度不同, 本文考虑一个由3种类型用户(居民用户、商业用户和工业用户)和一家供电商基于区块链交易平台(见图1)构成的智能电网交易系统。

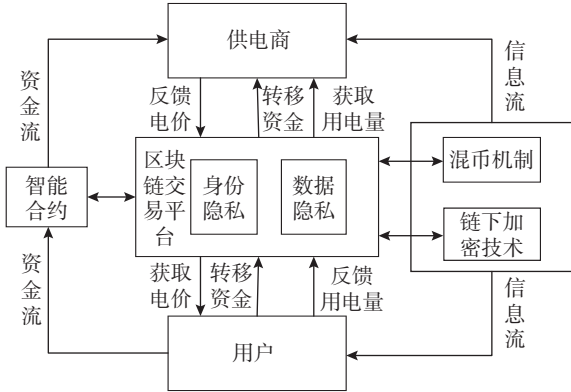


图1 基于区块链隐私保护的电力交互系统

Fig.1 Power interaction system based on blockchain privacy protection

在此系统中, 供电商通过区块链交易平台实时更新电价, 引导用户合理用电, 用户根据供电商提供的电价来规划用电行为。所有的交易信息(电价、供电量等)均通过区块链交易平台进行实时交互。当交易达成后, 通过智能合约来记录交易过程。供需双方高度自治化, 降低了交易双方信息泄露的风险, 有利于隐私保护, 提高交易效率。区块链的隐私保护可以分为保护身份隐私和保护数据隐私两个方面^[24]。身份隐私指交易双方的基本信息和地址信息。数据隐私指的是区块链上储存的交易数据, 如用电量与电价。保护这两类隐私通常应用混币机制和链下加密技术。混币机制可以将多个交易混合在一起, 破坏原有的交易输入输出关系来实现完全匿名, 进而保护身份隐私。链下加密技术保护数据隐私的方式为先在链下通过加密的方式将隐私数据加密后, 再将密文上链存储。基于此, 本文构建了图1的基于区块链隐私保护交易平台的电力交互系统。

本文所涉及的变量及其含义如表1所示。

将一天作为一个用电周期, 分割为 T 个时隙, 即 $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 。令 R , B 和 I 分别为居民用户、商业用户和工业用户的集合。令 x_r^t , x_b^t 和 x_i^t 分别为居民用户 $r \in R$ 、商业用户 $b \in B$ 和工业用户 $i \in I$ 在时隙 $t \in T$ 内消耗的电量。令 m_r^t , M_r^t , m_b^t , M_b^t 和 m_i^t ,

M_i^t 分别表示居民用户、商业用户和工业用户的最小和最大电力消耗, 即 $m_r^t \leq x_r^t \leq M_r^t$, $m_b^t \leq x_b^t \leq M_b^t$ 和 $m_i^t \leq x_i^t \leq M_i^t$ 。供电商在时隙 $t \in T$ 能提供给居民用户、商业用户和工业用户的最大和最小电量分别为 $l_{r,\max}^t$, $l_{r,\min}^t$, $l_{b,\max}^t$, $l_{b,\min}^t$, $l_{i,\max}^t$ 和 $l_{i,\min}^t$ 。

1.1 供电侧模型

1.1.1 供电成本

为了刻画区块链的隐私保护对供电商售电的影响, 本文将区块链应用程度量化到供电商的成本函数上, 即供电商的供电成本由发电成本 C_g 、储电成本 C_s 和期望隐私成本 C_k 这3部分组成, 即供电商的成本函数为

$$C = C_g + C_s + C_k \quad (1)$$

a. 发电成本。

供电商的发电成本函数应具有严格递增性和凸函数的性质, 故对于3类用户产生的发电成本, 采用以下二次函数^[25]来表示, 即

$$C_g^r = a(l_r^t)^2 + w l_r^t + c \quad (2)$$

$$C_g^b = a(l_b^t)^2 + w l_b^t + c \quad (3)$$

$$C_g^i = a(l_i^t)^2 + w l_i^t + c \quad (4)$$

式中, C_g^r , C_g^b 和 C_g^i 分别为供电商供给3类用户产生的发电成本, $a > 0$, $w \geq 0$ 和 $c \geq 0$ 为预设参数。

供电商的发电成本 C_g 为

$$C_g = C_g^r + C_g^b + C_g^i \quad (5)$$

b. 储电成本。

由于供需双方信息不对称, 供电商的发电量往往大于用电量, 需要对多余的电量进行储存, 这样就产生了储电成本。区块链的应用为用户实时消纳电量提供了可能, 其应用程度越高, 供需双方的信息差越小, 从而储电量减少, 储电成本降低。

假设储电成本 C_s 是储电量的一次函数, 不妨设为

$$C_s = (1 - \rho) d \left[l_r^t + l_b^t + l_i^t - \left(\sum_{r \in R} x_r^t + \sum_{b \in B} x_b^t + \sum_{i \in I} x_i^t \right) \right] \quad (6)$$

式中, d 为预设参数, $d > 0$ 。

c. 期望隐私成本。

隐私信息的泄露并不是一个必然发生的事件, 可以看成为一个概率事件。区块链技术的应用能够降低隐私信息泄露的风险, 且应用程度越高, 隐私信息泄露的概率就越低。但区块链技术

表 1 变量及其含义
Tab.1 Symbol descriptions

变量	含义
t	时隙
T	时隙数
r, b, i	居民用户、商业用户和工业用户
x_r^t, x_b^t, x_i^t	时隙 t 下居民用户、商业用户和工业用户的用电量
l_r^t, l_b^t, l_i^t	供电商在时隙 t 下提供给居民用户、商业用户和工业用户的发电量
d	单位储能成本
e	隐私信息泄露的概率系数
e_m	隐私信息初始泄露概率系数
m_1	用户的平均收入
t_p	骚扰电话时间
t_g	恢复注意力时间
m_2	电信诈骗金额
f	用户数
p_1, p_2, p_3	供电商出售给居民用户、商业用户和工业用户的电价
ρ	区块链的应用程度
X_1, X_2, X_3	居民用户、商业用户和工业用户对隐私信息的敏感程度
$\omega_r^t, \omega_b^t, \omega_i^t$	居民用户、商业用户和工业用户耗电量的满意度参数
$\omega_{r,0}^t, \omega_{b,0}^t, \omega_{i,0}^t$	居民用户、商业用户和工业用户耗电量的满意度参数初始值

的应用只能减少隐私信息泄露的可能而不能完全避免隐私泄露, 即区块链应用程度为 100% 时, 隐私信息也会有泄露的概率。隐私泄露的概率和区块链应用程度呈指数函数关系, 为了刻画两者的关系, 引入一个刻画隐私信息泄露的概率系数 e :

$$e = e_m q^\rho \tag{7}$$

式中, $0 \leq q \leq 1$ 和 $0 \leq \rho \leq 1$ 分别为指数函数中的底数和指数。

为了更加直观地说明区块链应用程度与隐私信息泄露概率之间的关系, 在 q 为 0.5、 e_m 为 0.5 的情况下, 绘制了区块链应用程度 ρ 从 0 到 1 时隐私信息泄露概率的变化图, 如图 2 所示。在设定隐私信息安全保护系数时, 最理想的设定需统计全球隐私数据总量以及隐私信息泄露的数量, 据此计算隐私信息初始泄露系数。然而未发现有机统计过权威数据, 故采用折衷办法取 $e_m=0.5$ 。

由图 2 可以直观地看出, 区块链应用程度越高, 隐私信息泄露概率越低。在区块链应用程度为 0 时, 隐私信息泄露概率最高。随着应用程度

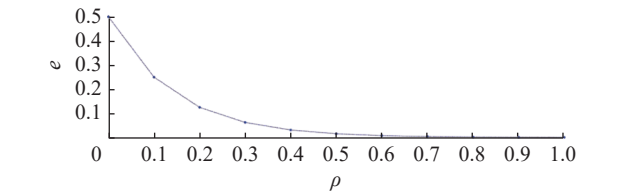


图 2 不同区块链应用程度下隐私信息泄露概率
Fig. 2 Probability of privacy information leakage under different blockchain application degrees

变高, 曲线走势由急到缓, 说明应用区块链对比未应用区块链, 隐私信息保护效果好很多。当区块链应用程度为 100% 时隐私信息的保护效果最好, 但隐私信息泄露概率也不为 0, 符合实际情况。

一旦供电商的生产安排等隐私信息泄露, 商业竞争对手的恶意竞争行为会对其造成巨大的经济损失。假定隐私信息泄露后的最大损失成本为 C_h , 则供电商的期望隐私成本 C_k 为

$$C_k = e C_h \tag{8}$$

1.1.2 售电收益

假定 p_1 , p_2 和 p_3 分别为供电商向居民用户、商业用户和工业用户提供的电价, 那么供电商的售电收益为

$$E = p_1 \sum_{r \in R} x_r^t + p_2 \sum_{b \in B} x_b^t + p_3 \sum_{i \in I} x_i^t \tag{9}$$

1.1.3 供电商的利润

供电商的利润为售电收益与供电成本的差, 即

$$F = E - C \tag{10}$$

1.2 用户侧模型

本文借助微观经济学中的效用函数量化用户对用电量的满意程度。为了刻画区块链的应用程度对 3 类用户的用电效用的影响, 本文将区块链的应用程度量化到 3 类用户的效用函数 $U(x, \omega)$ 里。

由于用户对隐私信息的敏感程度不同, 引入随机变量 X 表示用户对隐私信息的敏感程度。由于对隐私信息完全敏感与完全不敏感这两种极端情况的用户非常少, 敏感程度居中的用户较多, 符合正态分布, 即 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 则用户用电量的满意度参数可以表示为

$$\omega = \omega_0 (X\rho + 1) \tag{11}$$

式中, ω_0 为用户耗电量的满意度参数初始值, $\omega_0 > 0$ 。

不同类型用户对隐私信息的敏感程度不同, 因此, 不妨用随机变量 $X_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$, $X_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 和 $X_3 \sim N(\mu_3, \sigma_3^2)$ 分别表示居民用户、商业用户和工

业用户对隐私信息的敏感程度,其中, $\mu_3 > \mu_2 > \mu_1$, $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$ 。

1.2.1 效用函数

a. 居民用户在不同的时段有不同的用电需求。当居民用户当前用电量不能满足基本用电需求时,无论电价如何,用户会持续购电直到满足基本需求,但这一过程中,用户的边际需求是递减的。当居民用户的用电量达到其基本需求时,用电效用达到最大值,不再随着用电量的增加而增加。本文引入以下二次函数^[26]来表示居民用户的用电效用,即

$$U(x_r^t, \omega_r^t) = \begin{cases} \omega_r^t x_r^t - \frac{a_0}{2} (x_r^t)^2, & 0 \leq x_r^t \leq \frac{\omega_r^t}{a_0} \\ \frac{(\omega_r^t)^2}{2a_0}, & x_r^t > \frac{\omega_r^t}{a_0} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $a_0 > 0$ 为给定的参数; ω_r^t 为居民用户用电的满意度参数。

$$\omega_r^t = \omega_{r,0}^t (X_1 \rho + 1) \quad (13)$$

式中, $\omega_{r,0}^t > 0$ 。

b. 由于商业用户的差异性,消耗相同的电量其满意程度不同。且在一定的电力消费阶段,商业用户用电效用的增加速度会随着用电量的增加而迅速增加。本文引入以下的对数函数^[27]来表示商业用户的用电效用,即

$$U(x_b^t, \omega_b^t) = \begin{cases} \omega_b^t \ln(x_b^t + \xi), & 0 \leq x_b^t \leq \frac{\omega_b^t}{\xi} \\ \omega_b^t \ln \frac{\omega_b^t + \xi^2}{\xi}, & x_b^t \geq \frac{\omega_b^t}{\xi} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\xi > 0$ 为给定的参数; ω_b^t 为商业用户用电的满意度参数。

$$\omega_b^t = \omega_{b,0}^t (X_2 \rho + 1) \quad (15)$$

式中, $\omega_{b,0}^t > 0$ 。

c. 工业用户的效用递增效率要比商业用户快,因此采用以下递增效用函数^[28]来刻画工业用户的用电效用,即

$$U(x_i^t, \omega_i^t) = \begin{cases} \omega_i^t \alpha \ln(x_i^t + \xi), & 0 \leq x_i^t \leq \frac{\omega_i^t}{\xi} \\ \omega_i^t \alpha \ln \frac{\omega_i^t + \xi^2}{\xi}, & x_i^t \geq \frac{\omega_i^t}{\xi} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\alpha > 1$ 为给定的参数; ω_i^t 为工业用户用电的满意度参数。

$$\omega_i^t = \omega_{i,0}^t (X_3 \rho + 1) \quad (17)$$

式中, $\omega_{i,0}^t > 0$ 。

1.2.2 用电成本

用户的用电成本由购电成本 C_j 和期望隐私成本 C_v 组成,即用户的成本函数 C_1 为

$$C_1 = C_j + C_v \quad (18)$$

a. 购电成本。

用户侧的购电成本 C_j 为

$$C_j = p_1 \sum_{r \in R} x_r^t + p_2 \sum_{b \in B} x_b^t + p_3 \sum_{i \in I} x_i^t \quad (19)$$

b. 期望隐私成本。

隐私成本分为两个方面^[29]:一方面为受到电话骚扰的骚扰成本,另一方面为电信诈骗造成的财产损失成本。骚扰主要受到骚扰电话影响,骚扰成本最直接地体现为时间成本,时间成本等于同等时间获得相应收入的数量,且接完电话后用户还需一段时间恢复注意力。假设恢复注意力的时间和通话时间相同,则骚扰成本 k_1 表示为

$$k_1 = m_1(t_p + t_g) \quad (20)$$

不同类型用户的骚扰成本是不同的,不妨用 k_1^r , k_1^b 和 k_1^i 分别表示居民用户、商业用户和工业用户的骚扰成本,其中 $k_1^i > k_1^b > k_1^r$ 。

电信网络诈骗会造成用户财产损失,财产损失成本 k_2 可以用电信诈骗的金额与用户数的比值来表示

$$k_2 = \frac{m_2}{f} \quad (21)$$

不同类型用户由电信诈骗造成的财产损失成本是不同的,不妨用 k_2^r , k_2^b 和 k_2^i 分别表示居民用户、商业用户和工业用户的电信诈骗的财产损失成本,其中 $k_2^i > k_2^b > k_2^r$ 。

3类用户的期望隐私成本分别为

$$C_v^r = e(k_1^r + k_2^r)n_1 \quad (22)$$

$$C_v^b = e(k_1^b + k_2^b)n_2 \quad (23)$$

$$C_v^i = e(k_1^i + k_2^i)n_3 \quad (24)$$

式中, n_1 , n_2 和 n_3 分别表示为居民用户、商业用户和工业用户的数量。

用户侧的期望隐私成本 C_v 为

$$C_v = C_v^r + C_v^b + C_v^i \quad (25)$$

1.2.3 用户的福利

用户的福利为用电效用与用电成本的差,则时段 t 用户侧的福利为

$$W = \sum_{r \in R} U(x_r^t, \omega_r^t) + \sum_{b \in B} U(x_b^t, \omega_b^t) + \sum_{i \in I} U(x_i^t, \omega_i^t) - C_1 \quad (26)$$

1.3 社会福利最大化模型

将供电侧与用户侧看成一个社会系统, 综合考虑供电商和用户双方的利益, 不妨将供电商的利润和用户的福利之和定义为社会福利, 则时隙 t 的社会福利为

$$W_1 = F + W \quad (27)$$

此外, 用户的用电量应不超过供电商的供电量, 基于社会福利最大化的目标建立如下定价模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\substack{m_r^t \leq x_r^t \leq M_r^t, r \in R \\ m_b^t \leq x_b^t \leq M_b^t, b \in B \\ m_i^t \leq x_i^t \leq M_i^t, i \in I \\ l_{r,\min}^t \leq l_r^t \leq l_{r,\max}^t, t \in T \\ l_{b,\min}^t \leq l_b^t \leq l_{b,\max}^t, t \in T \\ l_{i,\min}^t \leq l_i^t \leq l_{i,\max}^t, t \in T}} \sum_{t \in T} W_1 \\ \text{s.t.} \quad \sum_{r \in R} x_r^t \leq l_r^t, \forall t \in T \\ \sum_{b \in B} x_b^t \leq l_b^t, \forall t \in T \\ \sum_{i \in I} x_i^t \leq l_i^t, \forall t \in T \end{array} \right. \quad (28)$$

$$W_1 = \sum_{r \in R} U(x_r^t, \omega_r^t) + \sum_{b \in B} U(x_b^t, \omega_b^t) + \sum_{i \in I} U(x_i^t, \omega_i^t) - C_g - C_s - C_k - C_v \quad (29)$$

每个时隙的电力消耗可以看成完全独立, 这样整个社会福利最大化问题就可以转化为只需考虑某一时隙的社会福利最大化问题, 即问题(28)可以被分成 T 个子问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\substack{m_r^t \leq x_r^t \leq M_r^t, r \in R \\ m_b^t \leq x_b^t \leq M_b^t, b \in B \\ m_i^t \leq x_i^t \leq M_i^t, i \in I \\ l_{r,\min}^t \leq l_r^t \leq l_{r,\max}^t \\ l_{b,\min}^t \leq l_b^t \leq l_{b,\max}^t \\ l_{i,\min}^t \leq l_i^t \leq l_{i,\max}^t}} \sum_{r \in R} U(x_r^t, \omega_r^t) + \sum_{b \in B} U(x_b^t, \omega_b^t) + \sum_{i \in I} U(x_i^t, \omega_i^t) - C_g - C_s - C_k - C_v \\ \text{s.t.} \quad \sum_{r \in R} x_r^t \leq l_r^t \\ \sum_{b \in B} x_b^t \leq l_b^t \\ \sum_{i \in I} x_i^t \leq l_i^t \end{array} \right. \quad (30)$$

问题(30)不包含电价变量, 不能直接求出最优的电价。通常采用其最优的拉格朗日乘子, 即影子价格作为电价^[30]。

问题(30)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} \psi(X^t, L^t, \lambda^t) = & \sum_{r \in R} U(x_r^t, \omega_r^t) + \sum_{b \in B} U(x_b^t, \omega_b^t) + \sum_{i \in I} U(x_i^t, \omega_i^t) - C_g - C_s - C_k - C_v - \\ & \lambda_r^t \left(\sum_{r \in R} x_r^t - l_r^t \right) - \lambda_b^t \left(\sum_{b \in B} x_b^t - l_b^t \right) - \\ & \lambda_i^t \left(\sum_{i \in I} x_i^t - l_i^t \right) = \\ & \sum_{r \in R} [U(x_r^t, \omega_r^t) - \lambda_r^t x_r^t - C_v^r] + \\ & \sum_{b \in B} [U(x_b^t, \omega_b^t) - \lambda_b^t x_b^t - C_v^b] + \\ & \sum_{i \in I} [U(x_i^t, \omega_i^t) - \lambda_i^t x_i^t - C_v^i] + \\ & [\lambda_r^t l_r^t + \lambda_b^t l_b^t + \lambda_i^t l_i^t - C_g - C_s - C_k] \end{aligned} \quad (31)$$

式中, $X^t = (x_r^t, x_b^t, x_i^t)$, $L^t = (l_r^t, l_b^t, l_i^t)$, $\lambda^t = (\lambda_r^t, \lambda_b^t, \lambda_i^t)$ 。

问题(30)的拉格朗日对偶问题的目标函数为

$$\begin{aligned} K(\lambda^t) = & \max_{\substack{m_r^t \leq x_r^t \leq M_r^t, r \in R \\ m_b^t \leq x_b^t \leq M_b^t, b \in B \\ m_i^t \leq x_i^t \leq M_i^t, i \in I \\ l_{r,\min}^t \leq l_r^t \leq l_{r,\max}^t \\ l_{b,\min}^t \leq l_b^t \leq l_{b,\max}^t \\ l_{i,\min}^t \leq l_i^t \leq l_{i,\max}^t}} \psi(X^t, L^t, \lambda^t) = \\ & \sum_{r \in R} G_r^t(\lambda_r^t) + \sum_{b \in B} G_b^t(\lambda_b^t) + \\ & \sum_{i \in I} G_i^t(\lambda_i^t) + S_r^t(\lambda_r^t) + \\ & S_b^t(\lambda_b^t) + S_i^t(\lambda_i^t) \end{aligned} \quad (32)$$

其中,

$$G_r^t(\lambda_r^t) = \max_{m_r^t \leq x_r^t \leq M_r^t, r \in R} U(x_r^t, \omega_r^t) - \lambda_r^t x_r^t - C_v^r \quad (33)$$

$$G_b^t(\lambda_b^t) = \max_{m_b^t \leq x_b^t \leq M_b^t, b \in B} U(x_b^t, \omega_b^t) - \lambda_b^t x_b^t - C_v^b \quad (34)$$

$$G_i^t(\lambda_i^t) = \max_{m_i^t \leq x_i^t \leq M_i^t, i \in I} U(x_i^t, \omega_i^t) - \lambda_i^t x_i^t - C_v^i \quad (35)$$

$$S_r^t(\lambda_r^t) = \max_{l_{r,\min}^t \leq l_r^t \leq l_{r,\max}^t, t \in T} \lambda_r^t l_r^t - \left(\frac{l_r^t}{l_r^t + l_b^t + l_i^t} \right) C \quad (36)$$

$$S_b^t(\lambda_b^t) = \max_{l_{b,\min}^t \leq l_b^t \leq l_{b,\max}^t, t \in T} \lambda_b^t l_b^t - \left(\frac{l_b^t}{l_r^t + l_b^t + l_i^t} \right) C \quad (37)$$

$$S_i^t(\lambda_i^t) = \max_{l_{i,\min}^t \leq l_i^t \leq l_{i,\max}^t, t \in T} \lambda_i^t l_i^t - \left(\frac{l_i^t}{l_r^t + l_b^t + l_i^t} \right) C \quad (38)$$

则该问题的对偶问题为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min K(\lambda^t) \\ \text{s.t.} \quad \lambda_r^t > 0, \lambda_b^t > 0, \lambda_i^t > 0 \end{array} \right. \quad (39)$$

采用梯度投影迭代法更新电价, 引入迭代式^[31]

$$\lambda_{h+1}^t = \left[\lambda_h^t - \gamma \frac{\partial K(\lambda_h^t)}{\partial \lambda^t} \right]^+ \quad (40)$$

式中: γ 为步长; $h \in H$, H 表示 λ^t 在 t 时段内更新的时间序列集合。

3 类用户实时电价的迭代更新公式分别为

$$\lambda_{r,h+1}^t = \left[\lambda_{r,h}^t + \gamma_1 \left(\sum_{r \in R} x_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t) - l_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t) \right) \right]^+ \quad (41)$$

$$\lambda_{b,h+1}^t = \left[\lambda_{b,h}^t + \gamma_2 \left(\sum_{b \in B} x_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t) - l_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t) \right) \right]^+ \quad (42)$$

$$\lambda_{i,h+1}^t = \left[\lambda_{i,h}^t + \gamma_3 \left(\sum_{i \in I} x_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t) - l_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t) \right) \right]^+ \quad (43)$$

式中, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为步长。

求解子问题(33)~(35)可以求得用户最优用电量 $x_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t)$, $x_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t)$ 和 $x_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t)$; 求解子问题(36)~(38)可以得到最优供电量 $l_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t)$, $l_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t)$ 和 $l_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t)$; 依据式(41)~(43)可以得到最优电价 λ_r^t , λ_b^t 和 λ_i^t 。

2 实时定价算法过程

2.1 算法1(用户侧)的计算过程

步骤1 对于3类用户 $r \in R$, $b \in B$, $i \in I$, 数据初始化;

步骤2 从供电商接收3类用户的电价 λ_r^t , λ_b^t 和 λ_i^t ;

步骤3 求解式(33)~(35), 更新用电量 $x_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t)$, $x_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t)$ 和 $x_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t)$;

步骤4 将用电量 $x_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t)$, $x_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t)$ 和 $x_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t)$ 传递给供电商。

2.2 算法2(供电侧)的计算过程

步骤1 初始化电价和供电量;

步骤2 将电价 λ_r^t , λ_b^t 和 λ_i^t 传递给用户, 求解式(36)~(38), 更新供电量 $l_r^{t*}(\lambda_{r,h}^t)$, $l_b^{t*}(\lambda_{b,h}^t)$ 和 $l_i^{t*}(\lambda_{i,h}^t)$;

步骤3 利用式(41)~(43)更新电价 λ_r^t , λ_b^t 和 λ_i^t ;

步骤4 若停止准则 $|\lambda_{r,h+1}^t - \lambda_{r,h}^t| \leq \varepsilon$, $|\lambda_{b,h+1}^t - \lambda_{b,h}^t| \leq \varepsilon$ 和 $|\lambda_{i,h+1}^t - \lambda_{i,h}^t| \leq \varepsilon$ (ε 为终止准则的容许误差, $\forall \varepsilon > 0$) 成立, 则算法终止; 否则, 重复步骤2和步骤3。

算法描述以及用户与供电商之间的互动如图3所示。

3 数值仿真

运用 Matlab 软件进行数值仿真。假设有一个供电商, $n_1=20$ 个居民用户, $n_2=20$ 个商业用户, $n_3=20$ 个工业用户, 其他参数参照文献[12,30-31]预先设置。电力供给侧参数设置为: $a=0.01$, $w=0$, $c=0.0006$, $d=0.02$, $\varepsilon=0.5$, $q=0.5$, $t_p=30$; 电

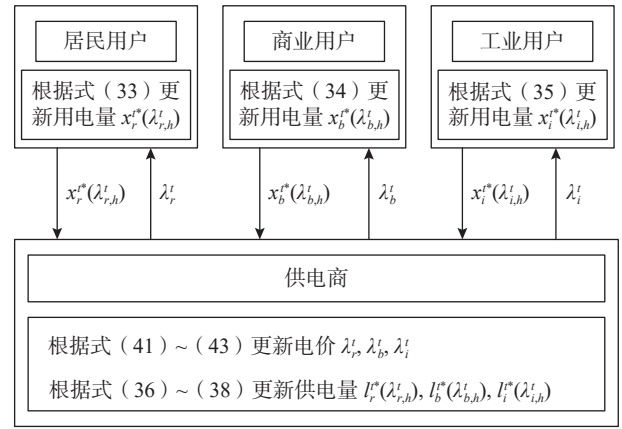


图3 实时定价算法流程

Fig. 3 Procedure of real-time pricing algorithm

力需求侧参数设置为: $\xi=0.9$, $\alpha=2$, $\omega_{r,0}^t \in [1,4]$, $\omega_{b,0}^t \in [1,4]$, $\omega_{i,0}^t \in [1,4]$ 。

3.1 仿真结果

由图4可知, 3类用户在区块链应用程度高时的用电量明显高于区块链应用程度低时, 且3类用户都倾向于在区块链应用程度高的时候进行用电。仿真结果与前文的理论分析一致, 即区块链的应用程度越高, 隐私泄露的风险就越低, 用户用电的意愿就越强烈。和居民用户相比, 商业用户和工业用户的用电意愿对区块链的应用程度更敏感, 即应用程度高和低时, 用电量的偏差更明显。这是因为, 在生产交易的过程中商业用户和工业用户隐私信息的泄露往往会对企业造成巨大的经济损失。图4表明区块链应用程度的提高有助于保护居民用户、商业用户和工业用户的隐私。和居民用户相比, 商业用户和工业用户更希望提高区块链应用程度。

由图5可知, 区块链技术的应用程度越高, 电价越低。这是因为, 区块链技术的应用程度越高, 供需双方获得的信息越准确, 隐私泄露的风险就越低, 从而供电商的供电成本就会降低。在

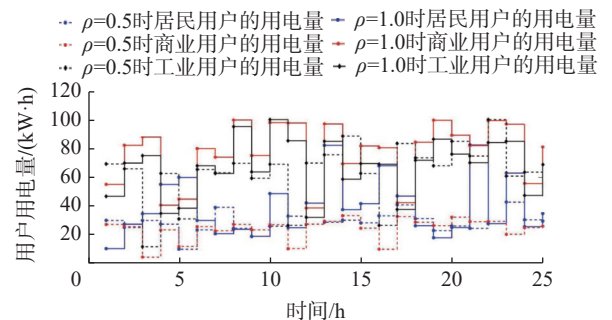


图4 不同区块链应用程度下3类用户的用电量对比

Fig. 4 Comparison of electricity consumption for three types of users under different blockchain application levels

供电商利润不变的前提下, 供电商的供电成本就会降低, 自然而然电价就会降低。

由图 6 可知, 整体而言, 供电商的利润和区块链应用程度呈正相关, 即区块链的应用程度越高利润越大。这是因为, 一方面, 随着区块链应用程度的提高, 供电商隐私信息泄露的风险就越低, 其隐私成本就越小。另一方面, 区块链应用程度越高, 用户由于隐私泄露导致的财产损失的可能就越低, 从而用户的用电意愿就越强烈。随着供电成本的减少和用户用电量的增加, 供电商的利润自然就会提高。

由图 7 可知, 整体而言, 区块链应用程度越高用户用电福利就越高。这是因为: 一方面, 随着区块链应用程度的提高, 用户隐私信息保护得更好, 用户由于隐私泄露导致的财产损失的可能就越低, 即用电成本就越低; 另一方面, 区块链应用程度越高, 用户从供电商处获得的信息就越准确, 对于相同用电量的满意度就越高, 即用电效用越高。随着用电成本的降低和用电效用的提

高, 用户的福利自然就会提高。

和商业用户及工业用户相比, 居民用户的用电福利对区块链应用程度越敏感, 即应用程度高低时, 用户福利的偏差更明显, 这也与实际相符。这是因为, 居民用户中有许多老人防诈骗意识较为薄弱, 会成为网络诈骗的目标人群, 隐私泄露的风险比较高。所以当区块链应用程度高的时候, 居民用户的用电福利得到更为明显的提升。

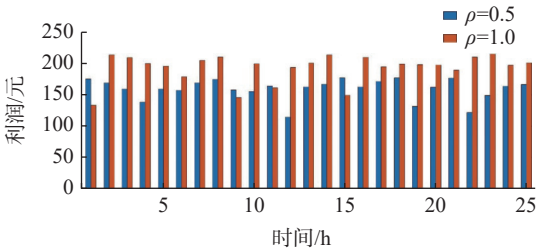
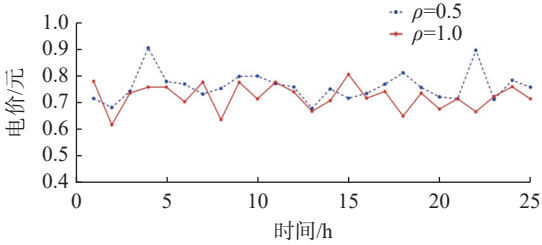
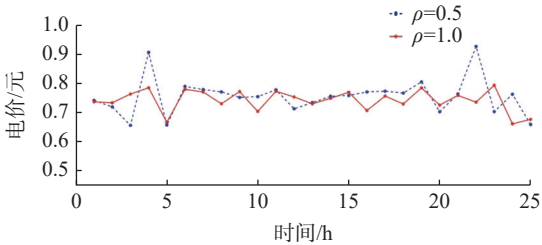


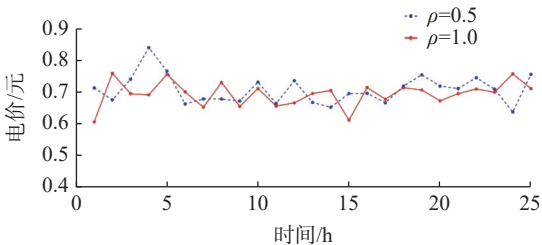
图 6 不同区块链应用程度下供电商的利润对比
Fig. 6 Profit comparison of power suppliers under different blockchain application levels



(a) 居民用户

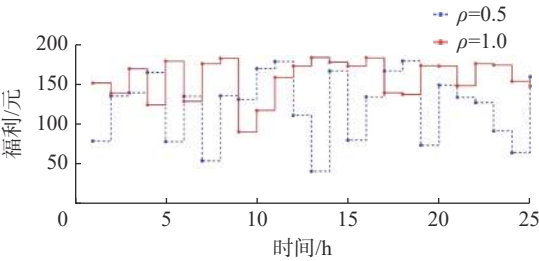


(b) 商业用户

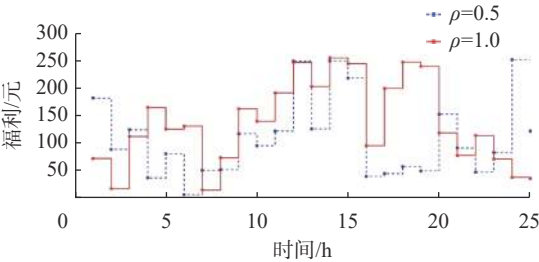


(c) 工业用户

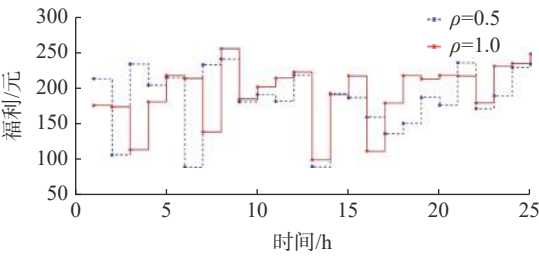
图 5 不同区块链应用程度下 3 类用户的电价对比
Fig. 5 Comparison of electricity prices for three types of users under different blockchain application levels



(a) 居民用户



(b) 商业用户



(c) 工业用户

图 7 不同区块链应用程度下 3 类用户的福利对比
Fig. 7 Welfare comparison for three types of users under different blockchain application levels

4 结 论

智能电网背景下的实时定价机制一方面未考虑隐私泄露对定价的影响,另一方面未考虑供需双方的利益均衡。因此,本文基于区块链技术构建了一种计及隐私保护的社会福利最大化模型。供电商根据隐私敏感程度的不同,将用户分为居民用户、商业用户和工业用户,在区块链的不同应用程度和追求社会福利最大化的目标下进行实时定价,通过电价指导用户的用电行为。数值仿真表明,区块链应用程度高的时候,供需双方的隐私信息得到了极大的保护,供电商的利润与3类用户的用电福利均得到提高。

参考文献:

[1] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11.

[2] 李士林. 智能电网技术现状及发展分析[J]. 科技与创新, 2021(3): 28-29.

[3] 李元诚,张攀,郑世强. 基于经验模态分解与同态加密的用电数据隐私保护[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1810-1818.

[4] 互联网信息服务投诉平台. 关于互联网信息服务投诉的情况[EB/OL]. [2021-09-29]. <https://ts.isc.org.cn/#/home>.

[5] BANSAL P, SINGH A. Smart metering in smart grid framework: a review[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing. Wagnaghat: IEEE, 2016: 174-176.

[6] 沈月,仲伟俊,梅妹娥. 消费者信息隐私保护对企业定价策略的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(2): 368-381.

[7] 王晨旭,程加成,桑新欣,等. 区块链数据隐私保护: 研究现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(10): 2099-2119.

[8] 刘双印,雷墨鹭兮,王璐,等. 区块链关键技术及存在问题研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 66-82.

[9] 沈海波,陈强,黄海. 语义区块链研究综述[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(7): 1937-1942.

[10] 林诗意,张磊,刘德胜. 基于区块链智能合约的应用研究综述[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(9): 2570-2581.

[11] ALCARAZ C, RUBIO J E, LOPEZ J. Blockchain-assisted access for federated Smart Grid domains: coupling and features[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2020, 144: 124-135.

[12] 李军祥,周继儒,何建佳. 基于区块链的电网实时定价混合博弈研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4183-4191.

[13] 周明,宋旭帆,涂京,等. 基于非侵入式负荷监测的居民用电行为分析[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3268-3274.

[14] 王继业,季知祥,史梦洁,等. 智能配用电大数据需求

分析与应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1829-1836.

[15] 王佳仁,谢宁,王承民,等. 提升现代配电系统效率和效益的研究与实践[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3543-3549.

[16] BOWIE N E, JAMAL K. Privacy rights on the internet: self-regulation or government regulation?[J]. Business Ethics Quarterly, 2006, 16(3): 323-342.

[17] 方晨,郭渊博,王一丰,等. 基于区块链和联邦学习的边缘计算隐私保护方法[J]. 通信学报, 2021, 42(11): 28-40.

[18] 邓明辉,唐邦熠,黄达,等. 基于区块链的微电网电力交易匹配机制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 95-101.

[19] 秦金磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 130-137.

[20] HASANKHANI A, HAKIMI S M, BISHEH-NIASAR M, et al. Blockchain technology in the future smart grids: a comprehensive review and frameworks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106811.

[21] 张钦,王锡凡,王秀丽,等. 需求侧实时电价下用户购电风险决策[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 16-20.

[22] 孙权,李军祥. 基于合作博弈的电力生产商多能互补优化策略[J]. 工业工程, 2020, 23(3): 84-90.

[23] LIU Y, HU S Y. Renewable energy pricing driven scheduling in distributed smart community systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(5): 1445-1456.

[24] 梁秀波,吴俊涵,赵昱,等. 区块链数据安全管理和隐私保护技术研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(1): 1-15.

[25] 吴志强,高岩,王波. “负载-效用”两级均衡下智能电网实时电价定价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 65-73.

[26] 高岩. 智能电网实时电价社会福利最大化模型的研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(10): 201-209.

[27] LIN J, XIAO B, ZHANG H L, et al. A novel multitype-users welfare equilibrium based real-time pricing in smart grid[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 108: 145-160.

[28] 刘博,李军祥,高岩. 智能电网分类用户实时电价算法研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2605-2609.

[29] 孙云龙. 隐私成本的模型研究[J]. 数学建模及其应用, 2018, 7(4): 64-74.

[30] 李军祥,潘婷婷,高岩. 智能电网互补能源供用电实时定价算法研究[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1092-1096.

[31] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C]//Proceedings of 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg: IEEE, 2010: 415-420.