控制与决策
Control and Decision

基于纳什谈判的共享经济区块链网络PoS共识传播博弈分析

谭春桥， 杨慧娟， 易文桃

引用本文:
谭春桥, 杨慧娟, 易文桃. 基于纳什谈判的共享经济区块链网络PoS共识传播博弈分析[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 219−229.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0445

基于纳什谈判的共享经济区块链网络PoS共识传播博弈分析

谭春桥†, 杨慧娟, 易文桃

(中南大学 商学院，长沙 410083)

摘 要: 针对共享经济中的信任问题,利用区块链技术搭建基于PoS(权益证明)共识机制的共享经济区块链网络,实现去信任化和去中心化. 在PoS共识机制中,区块链用户提供交易费用,从而激励矿池招募验证者进行区块传播验证,区块链用户与矿池都能从更多的验证者数量中获益,但验证者越多,双方付出的成本越高. 首先,从纳什谈判的角度研究共享经济区块链网络PoS共识机制中区块链用户与矿池的利益冲突问题,在交易费用与验证者数量之间进行权衡,构建纳什谈判博弈模型;然后,证明区块链用户与矿池的纳什谈判博弈模型中纳什谈判解的存在性和唯一性,得到区块链用户和矿池的最优决策;最后,通过数值算例分析通信成本和验证者数量对区块链用户和矿池的最优决策以及效用的影响. 研究结果表明:区块链用户与矿池都能从较低的通信成本中获益;纳什谈判博弈模型能够有效解决共享经济区块链网络中用户与矿池的利益冲突,提高网络效率.

关键词: 共享经济；区块链；矿池；PoS共识机制；纳什谈判；交易费用

中图分类号: C931 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0445 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

引用格式: 谭春桥,杨慧娟,易文桃. 基于纳什谈判的共享经济区块链网络PoS共识传播博弈分析[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 219-229.

Game analysis for PoS incentive consensus propagation in sharing economy blockchain network based on Nash negotiation

TAN Chun-qiao†, YANG Hui-juan, YI Wen-tao

(School of Business，Central South University，Changsha 410083，China)

Abstract: Aiming at the trust problem in the sharing economy, the blockchain technology is used to build a shared economic blockchain network based on the proof-of-stake (PoS) consensus mechanism to achieve de-trust and decentralization. In PoS, the blockchain user provides transaction fees to encourage the mining pool to recruit verifiers for block propagation verification. Both the blockchain user and mining pool can benefit from more verifiers, but get the higher cost. This paper studies the conflict of interest between the blockchain user and mining pool in PoS of the sharing economic blockchain network from the perspective of Nash negotiation, and weighs the transaction fee and the number of verifiers to construct the Nash negotiation game model. Then, the existence and uniqueness of the Nash negotiation solution in the Nash negotiation game model is proved, and the optimal decision of the blockchain user and mining pool is obtained. Finally, numerical examples are used to analyze the impact of the communication cost and the number of verifiers on the optimal decision-making and utility of the blockchain user and mining pool. The research results show that both the blockchain user and mining pool can benefit from lower communication costs. And the Nash negotiation game model can effectively solve the conflict of interests between users and miners in the sharing economic blockchain network and improve network efficiency.

Keywords: sharing economy；blockchain；mining pool；PoS consensus mechanism；Nash negotiation；transaction fee

0 引 言

随着经济的迅猛发展,人们的物质生活不断丰富,社会逐渐从稀缺型经济转变为过剩型经济.“共享经济”的出现,整合了线下的闲置资源,为个人之间的大规模商业互动铺平了道路,实现了资源的有效配置[1]. 共享经济的核心在于信任,如何在陌生人之间建立信任是共享经济模式的设计关键[2]. 目前,共享经济选择了以Airbnb和“滴滴”为代表的第三方平台

收稿日期: 2020-04-20；**修回日期:** 2020-09-30.
基金项目: 国家自然科学基金项目(71971218).
责任编委: 徐泽水.
†通讯作者. E-mail: chunqiaot@sina.com.

来建立和维护用户之间的信任[3]. 然而,共享平台搭建的信任体系仍不完善,无法完全避免信任危机. 此时,作为去信任化的区块链技术[4]异军突起,为共享经济的信任问题提出了一个切实可行的解决办法.

区块链本质上是一台信任机器,利用加密技术和共识机制保证交易的安全性和有效性,为面向平台的共享经济提供替代方案[5]. 区块链在共享经济中的潜在应用包括协作、对等市场、识别[6]以及交易系统[7]等. 利用区块链技术构建共享经济的底层架构,有望做到去中介化的信任,其中建立信任并实现交易的核心在于共识机制[8]. 共识机制保证了信息传播过程中的数据一致性,即在一个互不信任的市场中,每个节点遵守协议,判断每一笔记录的真实性,最终将判断为真的记录存入区块链中. 不同节点按照同一共识机制交换信息并达成共识的过程,即共识传播[9]. 以网约车运营模式为例,区块链技术实现了点对点的汽车共享,无须经过Uber、“滴滴”打车等中介平台. 所有用户的个人和交易信息都受共识机制的保护,保证数据不可篡改,有效增加了共享汽车交易双方的信息可信度.

目前,有关共识机制[10]的研究主要集中于PoW(工作量证明)共识机制. 共识机制可以描述成虚拟的挖矿过程,区块链的每个节点都是一个矿工. 文献[11]采用启发式方法,检测了基于PoW区块链网络中的自私挖矿攻击. 一些研究[12-15]构建Stackelberg博弈模型和拍卖模型,研究PoW机制下矿工与算力提供商的最优定价策略. 然而,PoW存在自私挖矿攻击和资源浪费问题[16],因此PoS(权益证明)共识机制被提出. PoS无需大量能源,解决了网络效率低下和资源浪费等问题[17-18],引起众多学者的关注. 例如,文献[19]构建了基于PoS的农业资源区块链,为农业资源自适应寻租和资源配置,提高了资源利用率;文献[20]指出,随着挖矿难度逐步增加,仅靠单个矿工生成一个区块需要耗费很长时间. 矿工为了追求持续稳定的收益,纷纷加入矿池,并贡献自己的权益来共同生成区块. 文献[21]等将矿工的策略演变过程建模为演化博弈,研究了矿池选择策略. 然而,上述研究均考虑矿工之间的竞争关系,未考虑区块链用户与矿池之间的利益冲突.

在共享汽车区块链网络中,以网约车运营模式为例,乘客作为区块链用户发起乘车交易,所有司机作为矿工组成一个矿池,矿工根据交易信息智能地将距离最近、成本最低的司机匹配给乘客,并将交易信息写入区块. 为使该区块被网络认可,矿池需要招募其他矿工作为自己的验证者,进行区块传播验证. 在PoS共识机制的区块传播过程中,区块链用户提供交易费用,以激励矿池招募更多验证者进行交易验证,减少交易处理时间[22]. 然而,过多的验证者会导致数据交换频繁,造成网络延迟,降低工作效率[23]. 矿池为获得更多的交易费用,会招募更多的验证者,但是验证者之间的通信成本也会更高. 因此,如何解决区块链用户与矿池间的利益冲突,如何在交易费用与验证者数量之间进行权衡,提高网络的工作效率,是PoS共识机制需要解决的一个核心问题.

近年来,一些学者对区块链用户提供的交易费用展开研究. 文献[22]构建了区块链用户与矿工间的非合作博弈模型,研究了交易费用的演变过程,结果表明用户支付交易费用可以缩短交易的等待时间;文献[24]使用排队论分析交易确认时间,认为费用越小交易确认时间越长;文献[25]构建了Stackelberg博弈模型,将区块链用户作为领导者,矿工作为追随者,确定最优交易费用. 上述文献虽然讨论了交易费用问题,但交易费用的确定不太符合现实. 在共享汽车区块链网络中,进入此领域的乘客和司机日益增多,挖矿难度逐渐增加,许多矿工更愿意加入矿池共同挖矿,矿池与区块链用户之间的地位关系正趋于平衡,因此考虑地位不对等的Stackelberg博弈无法解决区块链用户与矿池间的利益冲突. 在区块传播过程中,区块链网络的目的是完成交易,区块链用户和矿池应当从集体理性出发,提高交易处理速率,收益公平分配,因此强调个人理性的非合作博弈对于研究此问题不适用.

纳什谈判[26]作为解决各个谈判方利益冲突的工具,描述了谈判方可能达成合作条件的协商过程. 纳什谈判博弈已被广泛应用于处理供应链的利益分配[27],以及评估网络决策单元效率[28]. 目前没有学者使用纳什谈判博弈解决区块链中的利益冲突问题. 在PoS共识机制中,达成网络共识的过程相当于区块链用户与矿池协商解决利益冲突,联合决策实现整体收益最大的谈判过程. 纳什谈判解代表了两个谈判者可能同意的所有预期,满足公平与效率之间的平衡,并给出了每个谈判方应从总收益中获得多少. 因此,纳什谈判解被视为收益公平分配的自然延伸. 与文献[25]不同的是,文献[25]使用了Stackelberg博弈,认为区块链用户有绝对的领导权,没有考虑到区块链用户和矿池对交易费用都有决策权,而本文认为区块链用户和矿池都有一定的谈判权力.

基于此,本文从纳什谈判的角度,对区块链用户

和矿池在PoS共识机制中的利益冲突进行分析,考虑区块链用户决定交易费用,矿池决定验证者招募比例,构建纳什谈判博弈模型,研究区块链用户和矿池的最优决策. 在此基础上进一步分析通信成本、挖矿奖励和验证者数量对区块链用户与矿池的最优决策以及收益的影响.

本文的主要内容分为5个部分:第1部分对共享经济和区块链的相关背景进行说明;第2部分对共享经济区块链网络PoS共识机制进行问题描述,进而构建纳什谈判博弈模型;第3部分是分析区块链用户与矿池之间纳什谈判解的存在性和唯一性;第4部分通过具体算例详细分析通信成本、挖矿奖励和验证者数量对区块链用户和矿池的最优决策的影响;第5部分为结论.

1　PoS共识机制的纳什谈判博弈模型

1.1　问题描述

在一个基于PoS共识机制的共享汽车区块链网络中,以“滴滴”为代表的网约车运营模式为例,司机将身份、位置、价格、评价等数据添加到带有个人法定身份信息的特定文件夹上,然后上传至区块链,并将司机作为网络中的节点,部署在该区块链网络中. 乘客在该网络中上传需求信息,包括起始地、目的地、服务类型等. 区块链从海量信息中筛选出匹配度最高的司机,并完成司机与乘客之间的交易. 此网络一般包括4个实体:区块链用户、矿池、矿工以及验证者. 在该网络下有一个矿池,矿池内包含矿工和验证者,发布交易请求的乘客作为区块链用户,司机作为矿工和验证者,如图1所示,所有矿工以及使用区块链客户端的移动设备都可以作为验证者[29].

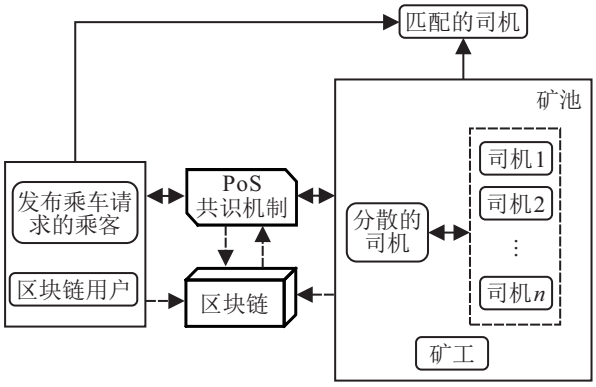


图1　以区块链技术为底层架构的共享经济

PoS共识机制的挖矿验证流程如图2所示. 区块链用户向网络广播新的交易;矿池内的每个矿工再根据自身能力以及网络环境[29]参与挖矿竞争,挖出包含该交易数据的区块;矿池招募验证者,对区块进行传播并验证其有效性;验证通过且达成共识的区块被添加到区块链上,矿池获得固定数量的挖矿奖励,以及区块链用户提供的交易费用[18].

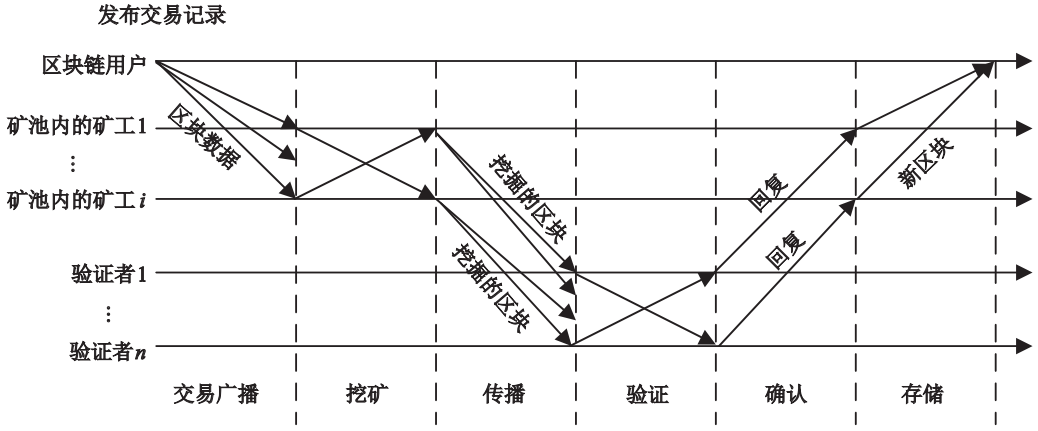


图2　PoS共识机制的挖矿验证流程

矿池内有一定数量的验证者,矿池决定自己的验证者招募比例r,组成验证者集. 该矿池内的矿工成功挖出区块之后,将此区块传播给验证者集进行验证,区块链用户为激励共识传播的尽快完成,向矿池提供单位交易费用x,矿池招募的验证者数量越多,获得的交易费用越高,同时在传播过程中,矿工与验证者之间存在单位通信成本α.

区块链用户决定单位交易费用x,作为矿池的传播奖励,激励矿池招募更多的验证者,验证者数量不同导致不同的区块传播时间,即一个区块通过验证并且达成网络共识所需的时间. 验证者数量越多,网络规模越大,区块验证的可靠性越高,然而过多的验证者可能导致区块传播延迟.

1.2　模型构建

在基于PoS共识机制的共享经济区块链网络中,包括一个矿池m和一个区块链用户s. 矿池决定其

验证者招募比例,用r表示,则矿池招募的验证者数量为rV,其中V是矿池内的验证者总量. 矿池赢得挖矿竞争的概率[29]取决于挖矿贡献,表示为$P_m = \varrho \mathrm{e}^{-\lambda z T}$. 其中:$\varrho$为一个矿池权益与网络总权益之间的比值;本文使用泊松过程的均值$\lambda = 1/600$作为一个随机变量,以模拟矿池内挖矿竞争的过程;$z > 0$为给定的延迟因子;T为区块中的交易量. 区块在传播过程中,矿池付出一定的通信成本$\alpha(rV)^2/2$. 其中:$\alpha > 0$为通信成本系数,α越大,通信成本越高,该成本结构描述了传播验证的边际收益递减. 矿池挖出区块并获得奖励的概率主要取决于其占有权益的比例,区块传播验证时间对矿池获得奖励的影响很小[21],因此本文暂不考虑区块传播时间对矿池收益的影响. 综上,矿池的收益函数U_m由挖矿奖励、区块传播验证奖励、由验证产生的通信费用以及其他挖矿成本c组成[25],表示为

$$U_m = RP_m + xrV - \frac{1}{2}\alpha(rV)^2 - c. \tag{1}$$

其中:R为网络发出的固定代币奖励,RP_m为根据矿池的挖矿贡献所获得的奖励;x为区块链用户支付的单位交易费用,矿池的传播奖励为xrV,其取决于矿池招募的验证者数量rV. 验证者之间的通信通过有线或无线连接,这在区块传播期间造成了一定的通信成本,用$\frac{1}{2}\alpha(rV)^2$表示.

由于招募的验证者数量不同,可能有不同的区块传播时间,其由所招募的验证者之间的传输延迟时间τ_p和块验证时间τ_v决定. 因此,对于大小为s的区块,区块传播时间[21]为

$$\tau(r) = \tau_p + \tau_v = \frac{srV}{\delta k_1} + k_2 rVs. \tag{2}$$

其中:$k_1 > 0$和$k_2 > 0$为网络给定的系数,δ为矿工与验证者进行通信的平均有效通道容量,rV/k_1为网络规模相关参数,$k_2 rVs$为由网络规模和平均验证速度确定的参数[29].

区块链用户的收益受到验证者数量、区块传播时间以及交易费用的影响. 矿池招募的验证者越多,网络规模越大,验证的可靠性越高,区块链网络越安全[25]. 然而,当验证者过多时,矿工可能需要与一些不必要的验证者进行通信,这将导致更长的区块传播时间,造成网络延迟. 因此,区块链用户的收益函数U_s由网络规模、区块传播时间以及交易费用组成,表示为

$$U_S = m_1 rV - m_2 \frac{\tau}{T_{\max}} - xrV = (m_1 - x)rV - \frac{m_2 s(1+\delta k_1 k_2)}{\delta k_1 T_{\max}} rV. \tag{3}$$

其中:$m_1 > 0$为网络规模带来的单位效益;$m_2 > 0$为区块传播时间带来的单位成本;$T_{\max}$为区块链用户能够容忍的区块传输延迟的最长时间;xrV为区块链用户付出的交易费用,其取决于矿池内的验证者数量rV和单位交易费用x.

在共享经济区块链网络中,以共享汽车为例,进入该领域的乘客和司机日益增多,即矿池的规模日益扩大,矿池与区块链用户之间的地位关系趋于相等. 因此,考虑区块链用户和矿池处于相同的地位,两者同时决定自己的策略选择,通过谈判的形式实现自身利益最大化,并且使网络整体效用最大化. 区块链用户与矿池之间的互动可以表现为纳什谈判,假设两者具有相同的谈判能力. 以下将探讨区块链用户与矿池在区块链网络中处于对等地位情形下的纳什谈判博弈.

纳什谈判过程如下:第1步,区块链用户发布交易. 第2步,矿池内的矿工将交易打包进入区块中. 第3步,区块链用户和矿池就交易费用x和验证者招募比例r进行纳什谈判,联合决策达到整体收益最大. 第4步,若谈判达成,则该区块进行传播验证,交易完成;若谈判失败,则交易失败,区块中的此交易被剔除. 考虑到理性的区块链用户提供的交易费用不会使自己的收益小于0,理性的矿池不会以负利润参与挖矿,因此区块链用户和矿池的谈判破裂点分别表示为$U_{S0} = 0$和$U_{m0} = 0$,即谈判失败时,交易不会完成,区块链用户和矿池的收益都为零. 区块链用户和矿池的纳什谈判博弈模型表现形式如下,记为模型P:

$$\mathrm{P}: \max_{x,r} U = (U_S - U_{S0})(U_m - U_{m0}) = U_S \cdot U_m; \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
&\text{s.t. } c_1: U_S \geqslant U_{S0},\\
&\quad c_2: U_m \geqslant U_{m0},\\
&\quad c_3: x \in \arg\max U_S,\\
&\quad c_4: r \in \arg\max U_m,\\
&\quad c_5: x > 0,\\
&\quad c_6: 0 \leqslant r \leqslant 1.
\end{aligned}$$

其中:U为区块链网络的期望收益,式(4)的目标函数表示以谈判的形式使参与方期望收益的纳什积函数最大,各方按纳什谈判解分配利益剩余. 约束条件c_1和c_2为个体理性约束,所有参与方的收益不能小于谈判破裂点的收益;约束条件c_3和c_4为激励相容约

束,参与方都是自利且理性的,各自基于自身期望收益的最大化选择策略,即区块链用户决定最优交易费用,矿池决定最优的验证者招募比例;c_5表示区块链用户提供的交易费用大于0;约束c_6表示矿池的验证者招募比例在$[0,1]$之间.

2　模型求解与均衡分析

纳什谈判博弈模型P的策略由区块链用户与矿池联合做出,目标是找到纳什谈判解,谈判方在联合决策下共同最大化纳什积函数,实现各方收益最大,同时使该网络的利益分配更加公平. 令x^*和r^*分别表示区块链用户的最优交易费用和矿池的最佳验证者招募比例,则(x^*,r^*)是纳什谈判博弈模型P的纳什谈判解.

接下来,本节针对区块链用户与矿池联合决策的纳什谈判模型P,研究区块链用户的最优交易费用x^*与矿池的最优验证者招募比例r^*.

定理1　最佳验证者招募比例r^*与最优交易费用x^*之间的关系如下:

$$r^*=\frac{1}{\alpha V}x^*. \tag{5}$$

证明　式(1)对交易费用r求一阶导,可得$\dfrac{\partial U_m}{\partial r}=xV-\alpha V^2 r$,以及二阶导$\dfrac{\partial^2 U_m}{\partial r^2}=-\alpha V^2<0$. 由此可知$U_m$是关于$r$的严格凹函数. 因此,对于矿池$m$,给定任意的交易费用$x>0$且满足$r>0$时,矿池的最优反应策略是唯一的.

令式(1)对r的一阶导等于0,可求得矿池的最优策略$r^*=\dfrac{1}{\alpha V}x^*$. 其中:$\alpha>0,V>0$. 由矿池决定的验证者招募比例$r>0$可知$x>0$,于是区块链用户决定的交易费用的最小值为$x_{\min}=0$. 因此,验证者招募比例$r$与交易费用$x$的关系为$r=\dfrac{1}{\alpha V}x$. 其中:$\alpha>0,V>0$. □

定理2　当满足$(m_1-2x)x-\dfrac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\dfrac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)x<\dfrac{2}{3}\alpha(RP_{\max}-c)$时,纳什谈判博弈模型P存在纳什谈判解$(x^*,r^*)$.

证明　根据式(5),将区块链用户的收益函数U_s和矿池的收益函数U_m都表示成关于交易费用x的函数,可得矿池的收益函数

$$U_m(x)=\frac{x^2}{2\alpha}+RP_m-c, \tag{6}$$

区块链用户的收益函数

$$U_S(x)=-\frac{1}{\alpha}x^2+\Big[\frac{m_1}{\alpha}-\frac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big]x. \tag{7}$$

式(7)对交易费用x求一阶导$\dfrac{\partial U_S}{\partial x}=-\dfrac{2}{\alpha}x+\dfrac{m_1}{\alpha}-\dfrac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\dfrac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)$,以及二阶导$\dfrac{\partial^2 U_S}{\partial x^2}=-\dfrac{2}{\alpha}<0$,由此可知,$U_s$是关于$x\in(0,+\infty)$的严格凹函数,此时,给定矿池的任意策略,区块链用户的最优反应策略是唯一的.

将区块链网络的收益函数表示为关于交易费用x的函数,可得

$$U(x)=\Big[-\frac{1}{\alpha}x^2+\frac{m_1}{\alpha}x-\frac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)x\Big]\times\Big(\frac{1}{2\alpha}x^2+RP_m-c\Big). \tag{8}$$

式(8)对交易费用x求一阶导,可得

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x}=\Big(-\frac{2x}{\alpha}+\frac{m_1}{\alpha}-\frac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big)\times\Big(\frac{x^2}{2\alpha}+RP_m-c\Big)-\frac{x^2}{\alpha^2}\Big(x-m_1+\frac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big), \tag{9}$$

以及二阶导

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2}=\frac{[3(m_1-2x)x-2\alpha(RP_m-c)]T_{\max}-3m_2 s\Big(\dfrac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)x}{\alpha^2 T_{\max}}. \tag{10}$$

由式(10)可知,当$(m_1-2x)x-\dfrac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\dfrac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)x<\dfrac{2}{3}\alpha(RP_{\max}-c)$时,$\dfrac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2}<0$,此时$U(x)$是关于$x$的严格凹函数,即存在纳什谈判解$x^*\in(0,+\infty)$使$U(x)$取得最大值.

综上所述,存在最优交易费用$x^*\in(0,+\infty)$,且最优的验证者招募比例$r^*=\dfrac{1}{\alpha V}x^*$,使区块链网络收益$U$取得最大值,即模型P存在纳什谈判解. □

定理3　纳什谈判博弈模型P的可行解是凸集.

证明　假设$(x',r'_1,\ldots,r'_i)$和$(x'',r''_1,\ldots,r''_i)$是模型P的可行解,对于任意$\lambda\in[0,1]$,有$\lambda x'+(1-\lambda)x''>0$和$\lambda r'_i+(1-\lambda)r''_i>0;\forall r_i$.

考虑模型P的约束条件$c_1,U_S(x)=-\dfrac{1}{\alpha}x^2+\Big[\dfrac{m_1}{\alpha}-\dfrac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\dfrac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big]x>0$:已知$x'$和$x''$是区块链用户的最优交易费用,则$U_S(x')>0,U_S(x'')>0,\min(x',x'')\leqslant\lambda x'+(1-\lambda)x''\leqslant\max(x',x'')$. 由$U_S(x)$严格凹函数的性质可知,满足$U_S(\lambda x'+(1-\lambda)x'')>0$,即区块链用户的收益大于谈判破裂点的收益$U_{S0}=0$,满足约束条件$c_1$.

考虑模型P的约束条件$c_2,U_m(x)=\dfrac{x^2}{2\alpha}+RP_m-$

$c>0$:x'和x''是区块链用户的最优交易费用,对于矿池,PoS激励共识机制的挖矿成本几乎为0,挖矿成功获得的奖励RP_m必然不小于挖矿成本c,因此$RP_m-c>0$. 由此可知$U_m(x')>0, U_m(x'')>0$,将$\lambda x'+(1-\lambda)x''>0$代入矿池的收益函数$U_m$,可得

$$U_m(\lambda x'+(1-\lambda)x'')=\frac{(\lambda x'+(1-\lambda)x'')^2}{2\alpha}+RP_m-c>0,$$

即矿池的收益大于谈判破裂点的收益$U_{m0}=0$,满足约束条件c_2. 类似的证明可用于其他约束条件,因此,模型P的可行解是凸集. □

定理2表明:在区块链用户与矿池的纳什谈判博弈模型中,当定理3的条件满足,即矿池在区块传播阶段获得的收益与通信成本之差小于2/3挖矿阶段的净收益时,必然存在一个纳什谈判解,能够实现整个区块链网络的效益最大化. 当定理3的条件得到满足时,区块链用户与矿池联合决策均有利可图,对谈判双方都是有利的.

定理3表明:在区块链用户和矿池的纳什谈判博弈模型中,可行分配集是凸集,说明模型P的局部最优解就是全局最优解. 约束条件形成的可行域为凸集是求解模型的最优解的必要条件,且说明区块链用户和矿池的纳什谈判解存在唯一性.

定理4 当$(m_1-2x)x-\dfrac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\dfrac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)x<\dfrac{2}{3}\alpha(RP_{\max}-c)$满足时,模型P存在唯一的纳什谈判解,即

$$x^*=\sqrt[3]{-\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}+\sqrt{\Big(\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}\Big)^2+\Big(\frac{3AC-B^2}{9A^2}\Big)^3}}+\sqrt[3]{-\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}-\sqrt{\Big(\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}\Big)^2+\Big(\frac{3AC-B^2}{9A^2}\Big)^3}}-\frac{B}{3A},\tag{11}$$

$$r^*=\frac{1}{\alpha V}x^*.$$

其中

$$A=-\frac{2}{\alpha^2},$$

$$B=\frac{3}{2\alpha}\Big(m_1-\frac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big),$$

$$C=-\frac{2}{\alpha}(RP_m-c),$$

$$D=(RP_m-c)\Big(\frac{m_1}{\alpha}-\frac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big).$$

证明 令$\dfrac{\partial U}{\partial x}=0$,即式(9)等于0,可得

$$-\frac{2}{\alpha^2}x^3+\frac{3}{2\alpha^2}\Big(m_1-\frac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big)x^2-\frac{2}{\alpha}(RP_m-c)x+(RP_m-c)\Big(\frac{m_1}{\alpha}-\frac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big)=0.\tag{12}$$

将式(12)化简可得

$$Ax^3+Bx^2+Cx+D=0.$$

其中

$$A=-\frac{2}{\alpha^2},\ B=\frac{3}{2\alpha}\Big(m_1-\frac{m_2 s}{T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big),$$

$$C=-\frac{2}{\alpha}(RP_m-c),$$

$$D=(RP_m-c)\Big(\frac{m_1}{\alpha}-\frac{m_2 s}{\alpha T_{\max}}\Big(\frac{1}{\delta k_1}+k_2\Big)\Big).$$

根据一元三次方程对根的卡丹公式法求解,可得一个实数根

$$x=\sqrt[3]{-\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}+\sqrt{\Big(\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}\Big)^2+\Big(\frac{3AC-B^2}{9A^2}\Big)^3}}+\sqrt[3]{-\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}-\sqrt{\Big(\frac{27A^2D-9ABC+2B^3}{54A^3}\Big)^2+\Big(\frac{3AC-B^2}{9A^2}\Big)^3}}-\frac{B}{3A}.$$

由上述分析可知,使$\dfrac{\partial U}{\partial x}=0$成立的唯一实数解$x$就是模型P的唯一纳什谈判解$x^*$,使区块链网络的整体效益$U$最大. 式(11)给出了区块链用户与矿池进行纳什谈判的唯一纳什谈判解. □

定理4表明:在区块链网络中,当矿池在区块传播阶段获得的收益与通信成本之差小于2/3挖矿阶段的收益时,区块链用户与矿池的纳什谈判博弈模型存在唯一的纳什谈判解. 区块链用户和矿池分别决定最优交易费用和最佳的验证者招募比例,实现网络整体收益最大,区块链用户与矿池都能从纳什谈判中获益. 从纳什谈判解的结构可以看出,纳什谈判解受到通信成本、挖矿奖励和验证者数量的影响,由于纳

什谈判解的解析式过于复杂,采用数值仿真分析探讨当通信成本、挖矿奖励和验证者数量增加时,纳什谈判解与区块链用户、矿池收益的变化情况.

3　数值仿真分析

本节通过数值仿真具体分析在共享经济区块链网络中,区块链用户与矿池进行纳什谈判的情形下,单位通信成本、挖矿奖励和验证者数量对区块链用户与矿池的最优决策以及收益的影响,并给出直观的结果和验证. 根据文献[25, 30],令一个矿池内的验证者总量范围为[20, 200],矿工与验证者之间的通信成本α遵循均匀分布,其范围为[0, 30],区块链网络提供的挖矿奖励范围为[1 000, 10 000],更多的参数设置如表1所示. 使用Matlab等数值仿真工具绘制图形,具体如图3～图5所示.

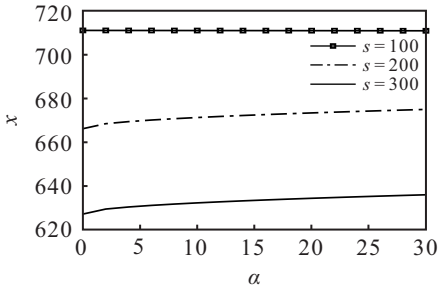
表 1　数值仿真中的参数设置

参数	设置
固定奖励[30] R	10 000
矿池成功挖矿概率 P_m	3/2 500
矿池的挖矿成本 c	0.1
挖出的区块的大小[25] s	100 kB
系统能容忍的最大延迟时间 $T_{\max}$	500 s
平均有效连接通道容量[30] δ	100 bps
m_1, m_2	10 000, 500
k_1, k_2	0.5, 0.5

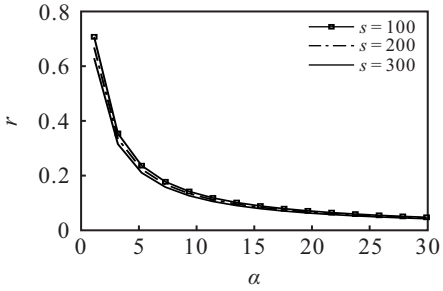
1) 单位通信成本的影响.

本部分主要分析单位通信成本α对区块链用户和矿池最优策略以及收益的影响. 文献[25]刻画了区块传播过程中的通信成本对验证者总量的影响,因此本文同样考虑矿工与验证者之间的通信成本范围为[0, 30],满足均匀分布. 此外,考虑到文献[25]中验证者总量在200附近的影响趋势最明显,因此假设该矿池内的验证者总量$V = 200$,矿池从验证者集中选择自己的验证者. 与文献[25]不同的是,为使结果更具有意义,将区块大小设置为3个值[29]$s = 100, 200, 300$,更易观察单位通信成本的影响趋势,数值结果如图3所示.

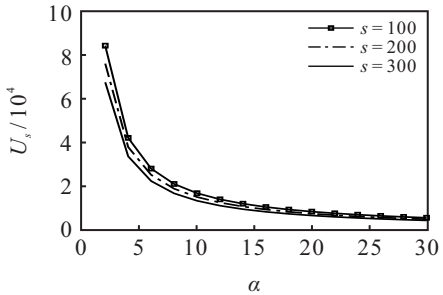
图3(a)反映了单位通信成本对区块链用户提供的交易费用的影响. 由图3(a)可知,交易费用随着单位通信成本的增加而增加,这说明了矿工与验证者间的单位通信成本越大,矿池招募验证者的动力越小,此时区块链用户为激励矿池招募更多的验证者进行共识传播,会提高交易费用. 另外,观察到矿工挖出的区块越大,区块链用户提供的交易费用越小,这是因为更大的区块会造成更长的区块传播时间,导致区块链用户付出更多的时间成本,为减少总成本,区块链用户会采取降低交易费用的措施.



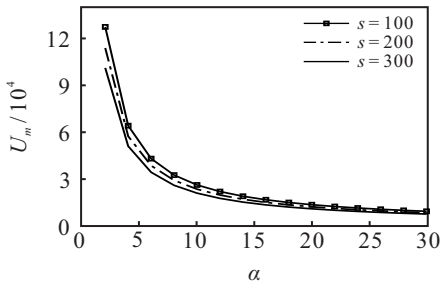
(a)　单位通信成本对交易费用的影响



(b)　单位通信成本对验证者招募比例的影响



(c)　单位通信成本对区块链用户收益的影响



(d)　单位通信成本对矿池收益的影响

图 3　单位通信成本的影响趋势

图3(b)反映了单位通信成本对矿池的验证者招募比例的影响. 由图3(b)可知,验证者招募比例随着单位通信成本的增加而减少,与文献[25]相同. 这说明了单位通信成本的增加导致矿池招募验证者的动力减小,同时区块链用户提高的交易费用不足以弥补通信成本带来的损失,因此矿池的验证者招募比例依然减少. 此外,还可以看出,矿工挖出的区块越大,验证者招募比例越小. 结合图3(a)可知,当区块越大时,

区块链用户提供的交易费用越低,导致矿池招募验证者的积极性不强,因此验证者招募比例越小.

图3(c)反映了单位通信成本对区块链用户收益的影响. 由图3(c)可知,区块链用户的收益随着单位通信成本的增加而减少,这说明随着单位通信成本的增加,区块链用户提供的交易费用在增加,然而矿池招募的验证者数量却在减少,区块链网络的规模收益在减小,因此区块链用户的收益随之减少. 与文献[25]不同的是,当单位通信成本很小时,对区块链用户收益减少的影响很大,但当通信成本很大时,对区块链用户收益的影响逐渐减小. 这是因为,当通信成本很大时,矿池招募的验证者数量在减少,且呈现接近0的趋势,区块链用户的交易也越难完成,因此通信成本对区块链用户收益的影响趋势与对验证者招募比例的影响趋势相同是合理的. 另外,还可以观察到区块越大,区块链用户的收益越小. 这是因为更大的区块造成更多的区块传播时间,区块链用户的时间成本在增加,从而收益在减少.

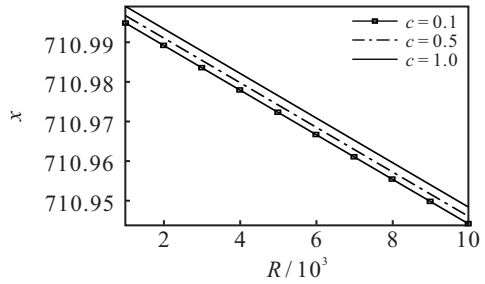
图3(d)反映了单位通信成本对矿池收益的影响. 由图3(d)可知,矿池的收益随着单位通信成本的增加而减少. 这说明随着单位通信成本的增加,交易费用的增加不足以弥补通信成本增加带来的损失,所以矿池的收益随之减少. 另外,可以观察到矿工挖出的区块越大,矿池的收益越低. 这是因为更大的区块导致更小的交易费用,减少了矿池招募验证者的动力,也减少了矿池的收益.

由上述分析可知:区块链用户和矿池都可以从更小的通信成本中获利,所以区块链网络需要降低矿工与矿工以及验证者之间的通信成本来吸引更多的参与者. 另外,矿工挖出较小的区块反而会增加矿池与区块链用户的收益.

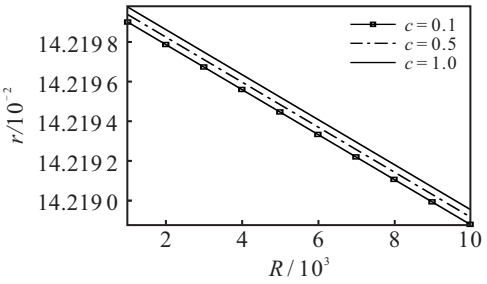
2) 挖矿奖励的影响.

这里主要分析挖矿奖励R对区块链用户和矿池的最优决策以及收益的影响,设置挖矿奖励R的范围[14]为$[1\,000, 10\,000]$. 假设一个矿池内验证者总量$V = 200$,成功挖矿概率$P_m = 3/2\,500$,挖出的区块大小$s = 100$. 为使结果更具意义,设置3种挖矿成本$c = 0.1, 0.5, 1.0$,更易观察挖矿奖励的影响趋势,数值结果如图4所示.

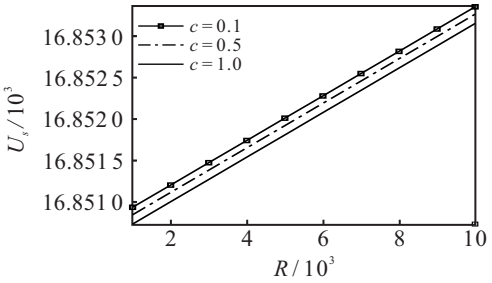
图4(a)展示了挖矿奖励对区块链用户提供的交易费用的影响. 由图4(a)可知,随着挖矿奖励的增加,区块链提供的交易费用减少,这说明当矿池的挖矿奖励增加时,会有越来越多的矿工和验证者参与网络,



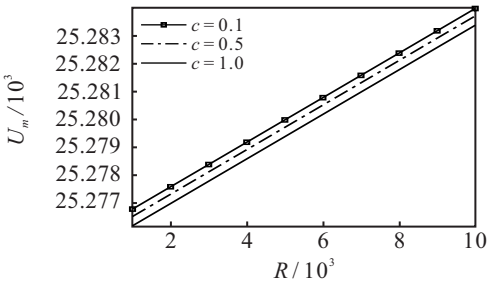
(a) 挖矿奖励对交易费用的影响



(b) 挖矿奖励对验证者招募比例的影响



(c) 挖矿奖励对区块链用户收益的影响



(d) 挖矿奖励对矿池收益的影响

图4 挖矿奖励的影响趋势

此时区块链用户会减少交易费用,使不必要的验证者离开该网络. 此外,观察到更大的挖矿成本反而提高了区块链用户的交易费用,这是因为当挖矿成本增大时,矿工参与网络的积极性降低,区块链用户为了激励更多的验证者参与,反而提高交易费用.

图4(b)展示了挖矿奖励对矿池招募验证者的比例的影响. 由图4(b)可知,随着挖矿奖励的增加,验证者招募比例减少,这说明挖矿奖励的增加导致交易费用减少,从而降低了验证者参与区块传播验证的动力,矿池招募的验证者比例随之减少. 此外,更大的挖矿成本反而提高了验证者招募比例. 这是因为当挖

矿成本增大时,交易费用的增加刺激了更多的验证者参与,反而提高了矿池招募验证者的比例.

图4(c)展示了挖矿奖励对区块链用户收益的影响. 由图4(c)可知,随着挖矿奖励的增加,区块链用户收益也增加,这说明当挖矿奖励增加时,区块链支付的交易费用减少,从而导致矿池内验证者招募比例也减小,以及由验证者数量引起的区块传播时间缩短. 交易费用和区块传播时间导致的成本降低,弥补了不必要验证者的离开产生的规模效益减少,因此区块链用户的收益得到增加. 此外,还可以观察到挖矿成本越大,区块链用户的收益越少. 这是合理的,因为挖矿成本的增加会造成交易费用的增加,刺激区块链网络的规模效益增加,然而提升的规模效益不足以弥补交易费用增加带来的损失,因而区块链用户的收益减少.

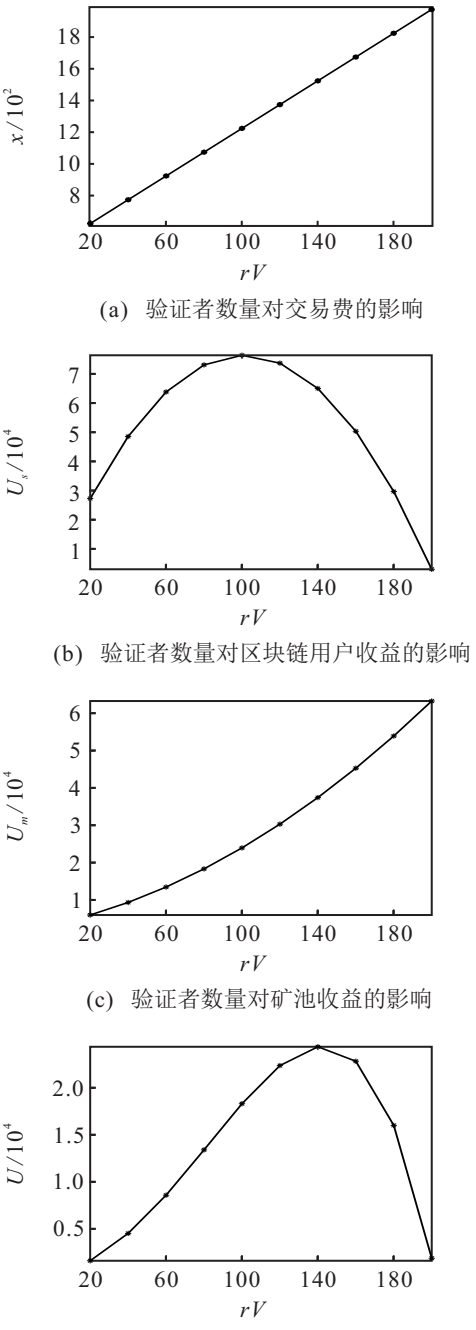
图4(d)展示了挖矿奖励对矿池收益的影响. 由图4(d)可知,随着挖矿奖励的增加,矿池的收益也增加,这说明当挖矿奖励增加时,矿池虽然获得较少的交易费用,但挖矿奖励的增加弥补了交易费用的减少,因而矿池的收益也会增加. 此外,还可以观察到,挖矿成本越大,矿池的收益越少. 这是合理的,因为增加的挖矿成本激励更多的验证者参与,然而验证者数量增加时获得的交易费用不足以弥补挖矿成本增加所带来的损失,所以矿池的收益减少.

由上述分析可知:挖矿奖励与区块链用户支付的交易费用成反比,若要提高矿池内验证者集的利用率,则区块链可以适当减少挖矿奖励,提高交易费用.

3) 验证者数量的影响.

本部分主要分析验证者数量rV对区块链用户的交易费用、区块链用户和矿池收益以及区块链网络收益的影响. 在文献[25]中,验证者数量在200处的影响趋势最明显,因此设置验证者数量的范围为$[20, 200]$. 文献[25]仅刻画了验证者数量对矿工收益和传播时间的影响,本文在此基础上,研究验证者数量对区块链用户和矿池收益以及区块链网络整体收益的影响. 假设一个矿池成功挖矿概率$P_m = 3/2\,500$,挖矿成本$c = 0.1$,挖出的区块大小$s = 100$,矿工与验证者间的通信成本$\alpha = 30$,数值结果如图5所示.

图5(a)说明了验证者数量对区块链用户提供的交易费用的影响,可以看出,交易费用随着验证者数量的增加而增加,这意味着当验证者数量增加时,区块链用户可以从验证者数量带来的网络规模效益中获得更多的收益,因此区块链用户仍然会提高交易费用,激励更多的验证者参与区块的传播验证.



(a) 验证者数量对交易费的影响

(b) 验证者数量对区块链用户收益的影响

(c) 验证者数量对矿池收益的影响

(d) 验证者数量对区块链网络收益的影响

图5　验证者数量的影响趋势

图5(b)说明了验证者数量对区块链用户收益的影响,可以看出,验证者数量增加时,区块链用户的收益先增加后减少,说明当验证者数量较少时,网络规模随着验证者总量的增加而扩大,区块链用户从增加的网络规模效益中获益. 然而,当验证者数量过多时,验证者数量越多,区块传播时间越长,造成的网络延迟越严重,因而区块链用户收益随之减少.

图5(c)说明了验证者数量对矿池收益的影响,可以看出,矿池的收益随验证者数量的增加而增加,这

意味着当矿池的通信成本固定时,验证者总量越多,矿池会招募越多的验证者以提高自己区块达成共识的可能性,并从中获益. 而在文献[25]中,矿工的收益随着验证者数量的增加而减小,这说明区块链用户和矿池进行纳什谈判,以集体理性的角度,为使交易尽快完成,区块链用户愿意提高交易费用,而矿池也能从更多的验证者中获益.

图5(d)说明了验证者数量对区块链网络整体收益的影响,可以看出,验证者数量增加时,网络整体收益先增加后减少,这意味着当验证者数量较少时,网络规模随验证者数量的增加而扩大,网络的整体收益随之增加,但过多的验证者导致较长的区块传播时间,降低网络的工作效率,使网络整体收益减少.

结合图5(b)和图5(c)可知,矿池为提高自己的利益会选择招募更多的验证者,区块链用户也可以从验证者数量带来的规模效应中获得更多的收益,但过多的验证者会导致网络延迟,降低区块链用户的收益,说明该纳什谈判博弈模型确实反映了区块链用户与矿池在PoS共识机制中的利益冲突. 区块链用户可以根据矿池的收益函数有效计算自身参与纳什谈判博弈的最优策略,决定最优交易费用,使矿池招募的验证者数量不仅满足双方利益最大化,而且实现区块链网络整体收益最大化,从而验证了基于纳什谈判博弈PoS共识机制的有效性.

4 结 论

共享经济领域的信任问题日益凸显,引起了社会的广泛关注和担忧,区块链技术的兴起给共享经济的交易信任提出了一个切实可行的解决方案. 区块链的核心在于共识机制,一个矿池参与挖矿并招募验证者进行区块传播验证,同时区块链用户向该矿池提供交易费用激励共识传播. 本文重点讨论了基于PoS共识机制的共享经济区块链网络中,区块链用户与矿池的利益冲突问题,考虑到区块链用户提供的交易费用与矿池招募验证者的数量之间的权衡,构建纳什谈判博弈模型,分析了区块链用户与矿池的最优决策以及决策所受的影响因素. 主要研究结论和管理启示如下:

1)区块链用户和矿池都能从更小的通信成本中获利,所以区块链网络要尽可能降低矿工与矿工以及验证者之间的通信成本来吸引更多的参与者.

2)矿池的验证者招募比例与区块链提供的挖矿奖励成负相关,因此若要提高矿池内验证者集的利用率,该网络可以适当减少挖矿奖励,提高交易费用,这与现实中区块链用户提供的交易费用在矿池获得的总奖励中的占比正逐渐增大的情况相符.

3)纳什谈判博弈模型能够有效解决区块链用户与矿池的利益冲突问题,使共享经济区块链网络的整体收益最大,实现利益公平分配,减少网络延迟,提高区块链网络的工作效率.

4)区块链的PoS共识机制为实现去中心化、去信任化的共享经济提供了技术支持. 针对共享汽车区块链网络,利用区块链技术代替第3方网约车平台,使乘客与司机直接点对点沟通匹配,增强乘客与司机间的信任和协作. 同时,纳什谈判模型有利于提高网络效率,加快交易处理的速度.

本文仅考虑信息是完全对称的情况,但实际上,在区块链网络中区块链用户与矿池的信息往往是私人信息. PoS共识机制主要包括挖矿和传播验证两个步骤,本文假定挖矿奖励为外生变量,考虑在传播验证阶段,区块链用户与矿池的利益冲突问题. 探讨博弈过程中的不完全信息,将挖矿奖励作为内生变量,构建区块链用户与矿池的目标函数以及该理论模型在解决现实问题时的具体应用,都需进一步深入研究.

参考文献(References)

[1] Hawlitschek F, Notheisen B, Teubner T. The limits of trust-free systems: A literature review on blockchain technology and trust in the sharing economy[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2018, 29(1): 50-63.

[2] Ert E, Fleischer A, Magen N, et al. Trust and reputation in the sharing economy: The role of personal photos in Airbnb[J]. Tourism Management, 2016, 55(55): 62-73.

[3] Teubner T, Hawlitschek F, Dann D. Price determinants on Airbnb: How reputation pays off in the sharing economy[J]. Journal of Self-Governance and Management Economics, 2017, 5(4): 53-80.

[4] Risius M, Spohrer K. A blockchain research framework[J]. Business & Information Systems Engineering, 2017, 59(6): 385-409.

[5] Hawlitschek F, Notheisen B, Teubner T, et al. A 2020 perspective on “The limits of trust-free systems: A literature review on blockchain technology and trust in the sharing economy”[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2020, 40(1): 100935-100937.

[6] Sun J J, Yan J Q, Zhang K Z K. Blockchain-based sharing services: What blockchain technology can contribute to smart cities[J]. Financial Innovation, 2016, 2(26): 1-9.

[7] Notheisen B, Cholewa J B, Shanmugam A P.

Trading real-world assets on blockchain[J]. Business & Information Systems Engineering, 2017, 59(6): 425-440.

[8] Nofer M, Gomber P, Hinz O, et al. Blockchain[J]. Business & Information Systems Engineering, 2017, 59(3): 183-187.

[9] Babich V, Hilary G. Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(2): 223-240.

[10] Liu Z Y, Luong N C, Wang W B, et al. A survey on blockchain: A game theoretical perspective[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 47615-47643.

[11] Chicarino V R, Albuquerque C, Jesus E F, et al. On the detection of selfish mining and stalker attacks in blockchain networks[J]. Annals of Telecommunications, 2020, 75(3/4): 143-152.

[12] Xiong Z H, Feng S H, Wang W B, et al. Cloud/fog computing resource management and pricing for blockchain networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4585-4600.

[13] Kim S. A novel bitcoin mining scheme based on the multi-leader multi-follower stackelberg game model[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 48902-48912.

[14] Li J N, Zhou Z Y, Wu J, et al. Decentralized on-demand energy supply for blockchain in internet of things: A microgrids approach[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(6): 1395-1406.

[15] Jiao Y T, Wang P, Niyato D, et al. Auction mechanisms in cloud / Fog computing resource allocation for public blockchain networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2019, 30(9): 1975-1989.

[16] Zhao N, Wu H, Chen Y L, et al. Coalition game-based computation resource allocation for wireless blockchain networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8507-8518.

[17] Nguyen C T, Hoang D T, Nguyen D N, et al. Proof-of-stake consensus mechanisms for future blockchain networks: Fundamentals, applications and opportunities[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 85727-85745.

[18] Yiran L, Junming K, Han J, et al. Improvement of the PoS consensus mechanism in blockchain based on shapley value[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(10): 2208-2218.

[19] Leng K J, Bi Y, Jing L B, et al. Research on agricultural supply chain system with double chain architecture based on blockchain technology[J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 86(1): 641-649.

[20] Qin R, Yuan Y, Wang F Y. Research on the selection strategies of blockchain mining pools[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2018, 5(3): 748-757.

[21] Liu X J, Wang W B, Niyato D, et al. Evolutionary game for mining pool selection in blockchain networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 760-763.

[22] Easley D, OHara M, Basu S. From mining to markets: The evolution of bitcoin transaction fees[J]. Journal of Financial Economics, 2019, 134(1): 91-109.

[23] Zheng Z B, Xie S A, Dai H N, et al. Blockchain challenges and opportunities: A survey[J]. International Journal of Web and Grid Services, 2018, 14(4): 352-375.

[24] Kasahara S, Kawahara J. Effect of Bitcoin fee on transaction-confirmation process[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2019, 15(1): 365-386.

[25] Kang J W, Xiong Z H, Niyato D, et al. Incentivizing consensus propagation in proof-of-stake based consortium blockchain networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 157-160.

[26] Binmore K, Rubinstein A, Wolinsky A. The Nash bargaining solution in economic modelling[J]. The RAND Journal of Economics, 1986, 17(2): 176-188.

[27] Du S F, Nie T F, Chu C B, et al. Newsvendor model for a dyadic supply chain with nash bargaining fairness concerns[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(17): 5070-5085.

[28] Mahmoudi R, Emrouznejad A, Rasti-Barzoki M, et al. A bargaining game model for performance assessment in network DEA considering sub-networks: A real case study in Banking[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(10): 6429-6447.

[29] Jin M, Chen X J, Lin S J, et al. Reducing the bandwidth of block propagation in bitcoin network with erasure coding[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 175606-175613.

[30] Asheralieva A, Niyato D. Distributed dynamic resource management and pricing in the IoT systems with blockchain-as-a-service and UAV-enabled mobile edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(3): 1974-1993.

作者简介

谭春桥 (1975–), 男, 教授, 博士生导师, 从事博弈论及应用、供应链管理等研究, E-mail: chunqiaot@sina.com;

杨慧娟 (1996–), 女, 硕士生, 从事博弈论及应用、共享经济的研究, E-mail: 1798800425@qq.com;

易文桃 (1990–), 女, 讲师, 博士, 从事供应链管理的研究, E-mail: 1196371785@qq.com.

(责任编辑：闫　妍)