

最小损失算法在区块链物联网中的优化研究

刘云, 宋凯, 陈路遥, 朱鹏俊

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

摘要: 区块链技术与物联网相结合能发挥去中心化优势,在一定程度上提升物联网系统数据安全性及可靠性等性能.但区块链的吞吐量受限特征,使得区块链较低的交易吞吐量在很大程度上难以满足物联网场景下的高吞吐量的业务需求.本文提出一种最小损失函数算法,首先,根据状态和动作输入对来构建状态空间和行为空间;其次,在系统延迟性约束条件下,迭代计算出状态空间和行为空间的行为价值函数;最后,利用损失函数对比行为价值函数的真实值和估计值后执行吞吐量最大值去调整块大小和块间隔.仿真结果表明,与 DDRL 算法和 DRL 算法相比,最小损失算法动态调整块大小和块间隔,在基于区块链的物联网系统达到稳定后可以获得更高的吞吐量.

关键词: 最小损失函数; 吞吐量; 行为价值函数; 区块链; 物联网

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.023002

Optimization of minimum loss algorithm in blockchain internet of things

LIU Yun, SONG Kai, CHEN Lu-Yao, ZHU Peng-Jun

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of
Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The combination of blockchain technology and internet of things can play a decentralized advantage and improve the data security and reliability of the internet of things system to a certain extent, but the flux limitation characteristics of the blockchain make the low transaction throughput of blockchain difficult to meet the high throughput business requirements in the internet of things scenario. In this paper, a minimum loss function algorithm is proposed, in which the state space and behavior space are first constructed according to the state and action input, and then the behavior value function of state space and behavior space are calculated iteratively under the condition of system delay constraint. Finally, the block size and block interval is adjusted by using the loss function to compare the true value and estimated value of the behavior value function. The simulation results show that, compared with the DDRL algorithm and the DRL algorithm, the minimum loss algorithm dynamically adjusts the block size and block spacing, and can obtain higher throughput after the blockchain based internet of things system reaches stability.

Keywords: Minimum loss function; Handling capacity; Behavioral value function; Blockchain; Internet of things

收稿日期: 2021-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61761025)

作者简介: 刘云(1973-), 男, 云南昆明人, 副教授, 主要研究领域为数据挖掘和区块链等. E-mail: liuyun@kmust.edu.cn

通讯作者: 宋凯. E-mail: 1612253143@qq.com

1 引 言

利用区块链技术去中心化、不可篡改等特点将区块链技术应用到物联网系统,降低了物联网信息交互的安全风险,在一定程度上提升了数据安全性及可靠性等性能,使其更加符合各类场景的应用要求^[1,2]. 现有区块链通量有限^[3],平均每秒只能处理几十笔交易,远远低于物联网应用每秒钟处理成百甚至上千笔的交易量,即区块链较低的交易吞吐量在很大程度上难以满足物联网场景下的业务需求^[4]. 影响区块链系统性能的因素主要是负载情况、计算资源和通信带宽^[5]. 而吞吐量与负载情况中每个区块中的交易数及产生两个区块的时间间隔有关^[6].

为了提高基于区块链的物联网系统的交易吞吐量, Qiu 等^[7]使用 DDRL 算法研究了一种基于许可的基于区块链的物联网架构,固定区块生产者的块大小,将共识协议选择和网络带宽分配联合优化,提高了区块链系统的吞吐量并满足不同用户的需求. Guo 等^[8]采用 DRL 算法固定了区块间隔,将每个生产者的块大小和生产块数化为联合优化问题,提高了覆盖的区块链系统的吞吐量和底层移动边缘计算系统中用户的服务质量.

增加区块大小或减小区块间隔对区块链吞吐量性能有一定的提升,但它们之间并不是简单的线性关系^[9]. 为了满足基于区块链的物联网系统的高交易吞吐量的需求,本文在计算资源和通信带宽一定的情况下,提出最小损失函数算法去动态联合调整区块大小和区块间隔. 首先初始化状态空间和行为空间以及其他系统参数;其次根据状态和动作输入对构建状态空间和行为空间,在系统延迟性约束条件下,计算出符合约束条件的状态空间和行为空间输入对的行为价值函数作为预测值;最后逐一计算符合约束条件输入对的行为价值函数,利用损失函数对比行为价值函数的预测值和真实值,执行吞吐量最大值去调整块大小和块间隔. 仿真结果表明,最小损失算法动态调整区块大小和区块间隔,在基于区块链的物联网系统达到稳定后显著提高了区块链物联网系统的链上事务吞吐量.

2 系统模型

2.1 系统模型

在物联网中,智能设备(如工业设备和监视设备等)能够以安全的方式存储和处理那些使用传感器收集环境数据或使用嵌入式摄像头捕获图像或

视频. 这些事务被转发给控制层,经控制器、服务器等设备处理后与区块生产者完成去中心化的共享交易. 当区块生产者之间达成共识后生成区块,此时区块链系统根据物联网节点参数动态调整进行资源优化,随后将调整方案回复到控制层,最终实现物联网层的优化^[10]. 考虑一个基于区块链的物联网系统,它由两部分组成(如图 1):生成数据后存储、处理和共享事务的物联网;以可靠和安全的方式处理事务的区块链系统.

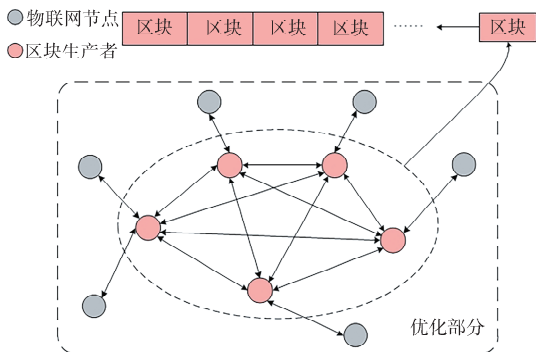


图 1 支持区块链的物联网系统模型
Fig. 1 An IoT system model that supporting blockchain

为了处理物联网生成的交易,区块生产者需要完成以下步骤^[10]: (1) 生成区块: 收集, 验证交易并将其打包为一个区块; (2) 将区块追加到区块链: 将生成的区块广播给其他块生成者, 并在对新块达成一致意见后, 将该块添加到它们的本地区块链中.

2.2 区块模型

在图 2 所示的区块模型图中, 区块^[11]由区块头和区块主体两部分构成. 区块头的大小为 80 字节, 包括 4 字节的版本号、32 字节的上一区块哈希值、32 字节的 Merkle 根节点、4 字节的时间戳、4 字节的难度值和 4 字节的随机数. 区块主体利用默克尔树结构来记录 10 min 内的交易信息.

区块链中每笔交易都要以字节的形式存储在每一个新产生的区块中, 但是每个区块容纳的交易数量是有限的, 因为每个区块都有自己的容量. 区块容量也称区块大小, 是指限定在每个区块存储的字节数, 代表了这个区块能容纳多少交易的能力. 区块间隔指的是上一区块生成后到下一区块生成的时间间隔, 与区块生成速率成反比关系. 增大区块容量可以容纳更多的交易, 减小区块生成间隔意味着交易以更快的速度得到确认, 两种方式都可提高区块链吞吐量性能, 然而区块链吞吐量性能与其影响因素之间并不是简单的线性关系. 区块增大会

导致出块时间过长; 区块间隔变小, 系统来不及处理过多交易, 从而导致区块变小. 因此, 我们需要动态考虑区块大小和区块间隔与当前区块生产者平均交易量的关系.

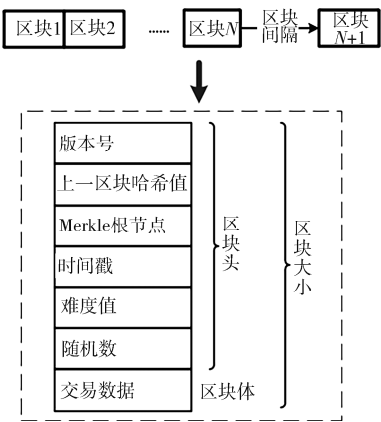


图 2 区块模型图
Fig. 2 Block model

假设区块链系统中有 N 个物联网节点和 K 个区块生产者, 区块生产者轮流生产的区块大小为 S^B (MB), 块间隔为 T^I (单位: s), 块大小最大限制为 \dot{S} 为 1 MB, 最大块间隔为 \dot{T} 为 15 s. 节点的集合表示 $\Phi_S = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$, 节点 $z_n, n = 1, 2, \dots, N$ 的利害关系和计算资源由 r_n (令牌) 和 c_n (GHz) 表示, 区块生产者的集合表示为 $\Phi_B = \{z_{b1}, z_{b2}, \dots, z_{bK}\}, \Phi_B \subseteq \Phi_S$.

3 最小损失算法

为了提高基于区块链的物联网系统的吞吐量, 提出最小损失函数算法对如图 1 所示的优化部分 (物联网和区块链的整合过程) 进行优化, 最小损失算法流程如图 3 所示.

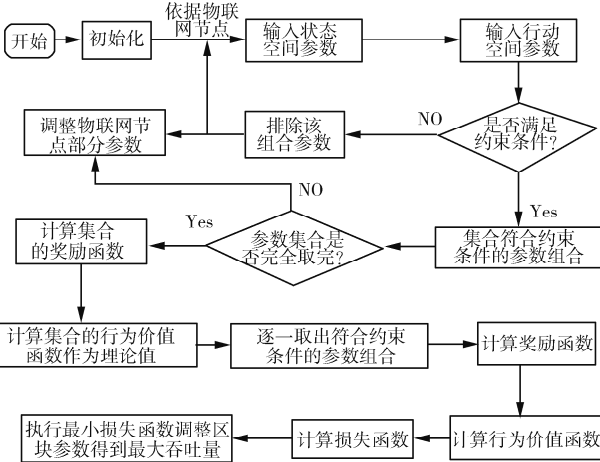


图 3 最小损失算法流程图
Fig. 3 Flow chart of optimization model

最小损失函数算法^[12] 包含一个初始化阶段, 该阶段用状态空间和行动空间近似得到行为价值函数的估计值; 以及一个学习阶段, 用于选择动作, 系统控制和动态网络更新^[12]. 下述优化算法的思路和详细步骤均按照图 3 所示的流程进行.

3.1 初始化阶段

初始化阶段, 首先进行系统参数的初始化, 接着在参数定义范围内逐一组合输入状态空间和行动空间参数, 在满足约束条件的情况下计算集合的奖励函数和行为价值函数近似为估计值.

3.1.1 约束条件 在区块链物联网系统参数满足系统延迟的条件下进行吞吐量的优化, 如下定义约束条件.

利用最终完成时间 (TTF)^[13] 来评估区块链系统的延迟, 该时间定义为交易确认完成并变得不可逆的时间. 交易处理包括两个阶段, 即生成区块和在验证者之间就生成的块达成共识.

$$T^{F,\delta} = T^I + T^{C,\delta}$$
 (1)

其中, T^I 是区块间隔时间; $T^{C,\delta}$ 是共识等待时间, 取决于所采用的共识算法 PBFT 共识协议. 整个验证过程分为两部分: 消息传递和消息验证 (验证签名及验物理地址), 共识等待时间又可细化为

$$T^{C,\delta} = T^{D,\delta} + T^{V,\delta}$$
 (2)

其中, $T^{D,\delta}$ 为消息传递时间; $T^{V,\delta}$ 为消息验证时间. 为了满足物联网的延迟要求, 假设应该在一系列连续的块间隔 $w (w > 1)$ 内发出并验证一个块. TTF 应满足约束如下式.

$$T^{F,\delta} \leq w \times T^I$$
 (3)

3.1.2 状态空间和行动空间 决策纪元 $t (t = 1, 2, \dots)$ 的状态空间^[13] 定义为事务大小 (交易规模) χ , 风险系数 γ , 物联网节点的地理位置 x , 物联网节点的计算能力 $c = \{ck\}$, 以及每对物联网节点之间链路的数据传输速率为 $R = \{R_{i,j}\}$ 的并集, 表示为

$$S^{(t)} = \{\chi, \gamma, x, c, R\}^{(t)}$$
 (4)

其中, 决策纪元 t 的动作空间^[12] 定义为区块生产者 a , 区块大小 S^B , 区块间隔 T^I 的并集, 表示为

$$A^{(t)} = \{a, S^B, T^I\}^{(t)}$$
 (5)

其中, $a = \{a_n\}, a_n \in \{0, 1\}, \sum_{n=1}^N a_n = K, z_n \in \Phi_S$ 表示区块生产者的指标, $a_n = 1$ 表示节点 z_n 作为块产生器, 否则 $a_n = 0$; 块大小 $S^B \in \{0.2, 0.4, \dots, \dot{S}\}$, 块区间 $T^I \in \{0.5, 1, \dots, \dot{T}\}$, 其中块大小最大限制为 \dot{S} , 最大块间隔为 \dot{T} .

根据状态空间和行动空间输入对进行系统延迟约束条件的判断

$$C_1: T^{F,d} \leq w \times T^I \quad (6)$$

为在调整负载情况下获得区块链物联网系统的最大吞吐量,将当前奖励^[14](即时奖励)定义为

$$R^{(i)}(S^{(i)}, A^{(i)}) = \begin{cases} \frac{|S^B/\chi|}{T^I}, & \text{满足约束条件} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $R^{(i)}$ 为奖励函数,代表了优化目标. 如果约束条件不能得到满足,意味着区块链物联网系统在延迟方面的性能较差,为了避免无效情况发生,此时设置奖励为 0.

接着在系统延迟满足约束的条件下去计算状态纪元的行为-价值函数值 $Q(S, A)$ 如下式.

$$Q(S, A) = E\left[\sum_{i=0}^{\infty} \mu^i R^{(i)}(S^{(i)}, A^{(i)}) \mid S^{(0)} = S, A^{(0)} = A\right] \quad (8)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示数学期望; μ 为折现因子^[15], 满足 $\mu \in (0, 1]$, 反映了当前奖励和未来奖励之间的权衡, 通常取 0.8.

3.2 学习阶段

学习阶段的目标是发现最优策略,即根据当前需要处理平均事务量来确定最佳动作,调整区块大小和区块间隔. 首先逐一取出符合约束条件的状态空间和行动空间参数对,计算当前奖励函数和行为价值函数,接着利用最小损失函数对比当前实际值和估计值,最终从这些奖励中选择收益最大和损失最小的行动作为实际行动.

3.2.1 算法实现 对同一个状态纪元的不同参数,进行式(7)奖励函数及式(8)行为价值函数计算后得到真实值,并将这些值存在经验记忆库 D 中,利用损失函数对比行为价值函数的真实值和估计值. 损失函数^[16]是一个非负实数函数,用来量化模型预测和真实标签之间的差异. 最小损失函数算法将反馈的奖励信息转化为对应状态的标记,可实现样本形式的统一,在计算方式相同和样本形式统一的前提下使用参数估计方式直接对模型参数进行近似估计,即使用最小二乘法构建损失函数,让预测值与真实值总的拟合误差(即总残差)达到最小.

$$L(\theta) = [y^{(i)} - Q(S^{(i)}, A^{(i+1)}; \theta)]^2 \quad (9)$$

其中, $y^{(i)}$ 为行为价值函数的状态纪元的真实值,计算公式为式(10); $Q(S^{(i)}, A^{(i+1)}; \theta)$ 为行为价值函数的状态纪元的估计值; θ 为真实值与估计值之间的差距,该函数的目的就是求解最优的 θ , 让函数

值最小.

$$y^{(i)} = R^{(i)} + \Upsilon \max_{A^{(i+1)}} Q(S^{(i+1)}, A^{(i+1)}) \quad (10)$$

接着在当前状态下选择收益最大和损失最小的行动 $A^{(i)} = \arg \max_A Q(S^{(i)}, A^{(i)})$, 执行 $A^{(i)}$ 进行动态调整块大小和块间隔,更新目标网络 Q 值后得到较大吞吐量. 综合可得最小损失函数算法的主要执行过程如算法 1.

算法 1: 最小损失函数算法

输入: 决策纪元 t 的状态空间 S 及行动空间 A , 构成输入对 (S, A) .

输出: 行为状态值函数 $Q(S, A)$, 以及损失函数 $L(\theta)$.

Begin

(1) 初始化阶段. 加载历史状态转换配置文件进行初始化, 根据历史经验记忆库 D 中进行主网络行为价值函数 $Q(S, A)$ 的估计.

(2) 学习阶段. 对每一个决策纪元 t 执行以下过程:

1) 输入状态空间和行为空间, 使用输入对 (S, A) 中对应的值去检验该输入对是否满足物联网区块链系统延迟性的约束;

2) 第 1) 步满足条件的情况下计算行为价值函数 $Q(S, A) = E\left[\sum_{i=0}^{\infty} \mu^i R^{(i)}(S^{(i)}, A^{(i)}) \mid S^{(0)} = S, A^{(0)} = A\right]$;

3) 观察奖励 $R^{(i)}$ 和下一个状态 $S^{(i+1)}$, 将经验值 $(S^{(i)}, A^{(i)}, R^{(i)}, S^{(i+1)})$ 存储到经验记忆库 D 中;

4) 从经验记忆库 D 中随机采样一个小批量状态转换 $(S^{(i)}, A^{(i)}, R^{(i)}, S^{(i+1)})$, 计算主网络行为价值函数的真实值 $y^{(i)} = R^{(i)} + \Upsilon \max_{A^{(i+1)}} Q(S^{(i+1)}, A^{(i+1)})$;

5) 训练估计网络中的参数以最小化损失函数 $L(\theta) = [y^{(i)} - Q(S^{(i)}, A^{(i+1)}; \theta)]^2$, 将目标网络中参数同步为估计网络参数;

6) 执行 $A^{(i)} = \arg \max_A Q(S^{(i)}, A^{(i)})$ 去调整目标网络的块大小和块间隔.

End

3.2.2 性能分析 事务吞吐量反映区块链物联网系统处理交易的能力. 最小损失函数算法在计算资源和通信带宽一定的情况下, 动态调整区块大小和区块间隔来提高基于区块链的物联网系统的事务吞吐量. 考虑到上述因素, 事务吞吐量的计算公式为

$$\Omega(S^B, T^I) = \frac{\lceil S^B/\chi \rceil}{T^I} \tag{11}$$

其中, S^B 表示块大小; T^I 表示区块间隔; χ 表示事务的平均大小, 即交易的平均规模. 仿真过程将依次讨论这 3 个变量独自改变引起的吞吐量变化情况, 以及整个吞吐量在 4 种不同方案的变化情况.

4 仿真分析

4.1 数据集及仿真环境

在仿真实验中, 考虑两个物联网节点密度不同的基于区块链的物联网系统场景, 场景一设有 100 个物联网节点和 21 个区块生产者, 分布在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的区域内; 场景二设有 1000 个物联网节点和 21 个区块生产者, 分布在 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的区域内. 拟议的最小损失函数算法框架的编程实现是使用 Window 10 系统中 Python 3.8 下的 PyTorch 0.4.0. 在进行共识过程的时候, 选择区块链系统研究中常用的 PBFT 共识协议. 表 1 总结了仿真中使用的参数设置.

表 1 仿真参数设置
Tab. 1 Simulation parameter setting

参数	场景一(a)	场景二(b)
节点的地理覆盖区域	1 km×1 km	1 km×1 km
物联网节点数, N	100	1000
区块生产者的数量, K	21	21
平均事务大小, χ	200 B	200 B
节点的利害关系, r_n	45 令牌	45 令牌
节点的计算能力, c	30 GHz/s	30 GHz/s
通信带宽, B	4 Mbps	4 Mbps
节点的数据传输速率 R	80 Mbps	80 Mbps
一个事务平均处理时间, \bar{t}	9 min	9 min
生成一个区块所需时间, T	10 min	10 min
块大小限制, \dot{S}	10 MB	10 MB
最大块间隔, \dot{T}	20 s	20 s
连续区块间隔数, w	6	6

为了验证拟议动态方案的可行性和吞吐量优化情况, 在仿真部分考虑了以下 3 种基线对比方案. (1) 静态方案: 固定块大小为 4 MB, 块间隔为 13 s; (2) DDRL 算法: 固定块大小为 4 MB, 块生产者以不同间隔生成区块; (3) DRL 算法: 固定块间隔为 13 s, 块生产者以不同大小的区块来处理事务.

4.2 与基准的吞吐量比较

根据式(11)可以看出, 事务吞吐量与块大小、块间隔以及事务的平均规模有关系, 在图 4~图 6 中分别探索了这 3 个参数对基于区块链的物联网系统的吞吐量的影响, 同时讨论了 4 种方案的吞吐量变化趋势. 图 7 讨论了在情节变化的情况下 4 种方案的吞吐量对比.

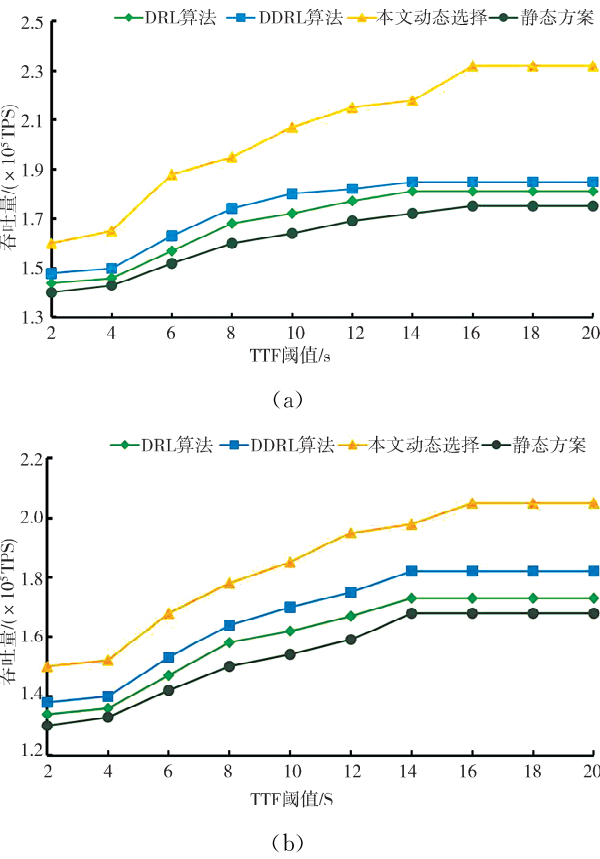


图 4 吞吐量与 TTF 阈值关系
Fig. 4 The relationship of throughput and TTF thresholds

TTF 阈值对基于区块链的物联网系统的吞吐量的影响如图 4 所示. 随着 TTF 阈值的增加, 4 种方案都获得了更高的交易吞吐量, 因为验证器可以在一个块中以更宽松的延迟约束来处理更多事务. 同时在场景一低密度物联网节点的情况下, 事务吞吐量比场景二高密度物联网节点要高, 因为在延迟相同的时候, 密度低的场景可以让区块有更好的选择和更多时间处理更多的事务. 但不论是哪个场景, 提出的算法可以比基线一致的实现更高的吞吐量.

图 5 检查了具有不同交易规模的交易吞吐量, 这在考虑不同类型的交易时是有意义的. 通过仿真图可以看出 4 种方案的吞吐量都随着交易规模的增加而降低, 因为对于大笔交易, 一个区块可以容

纳较少数量的交易. 同时在两个物联网节点密度不同的场景下, 提出的算法均可在平均交易大小变化的情况下获得更高的吞吐量.

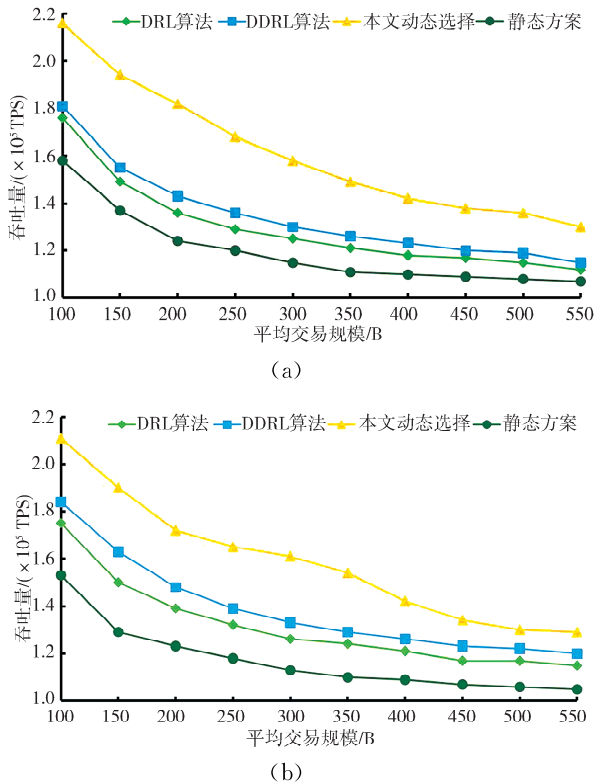


图 5 吞吐量与平均交易规模关系
Fig. 5 The relationship of throughput and average transaction size

图 6 讨论了块大小限制对吞吐量的影响, 随着区块大小限制的增加, 基于区块链的物联网系统可以处理更多交易, 在两个物联网节点密度不同的场景下, 提出的算法均可获得更高的交易吞吐量, 这适用于除固定区块大小方案之外的所有方案. 而 TTF 约束条件的存在限制了一个块中的最大事务数, 且区块增大会导致出块时间变长而影响区块间隔, 因此吞吐量不会无限增加.

图 7 讨论 4 种方案在情节数增加的情况下吞吐量的变化, 可以看出, 在学习过程开始时, 事务吞吐量较低, 随着情节数量的增加, 吞吐量逐步提高并在大约 4000 情节后达到稳定状态, 这验证了我们提出的方案的收敛性能. 此外还可以发现, 静态方案由于缺乏弹性而具有最低的吞吐量, DDRL 算法和 DRL 算法的由于适当调整区块参数而具有较高的吞吐量, 在两个物联网节点密度不同的场景下, 所提出的算法可以获得更高的吞吐量.

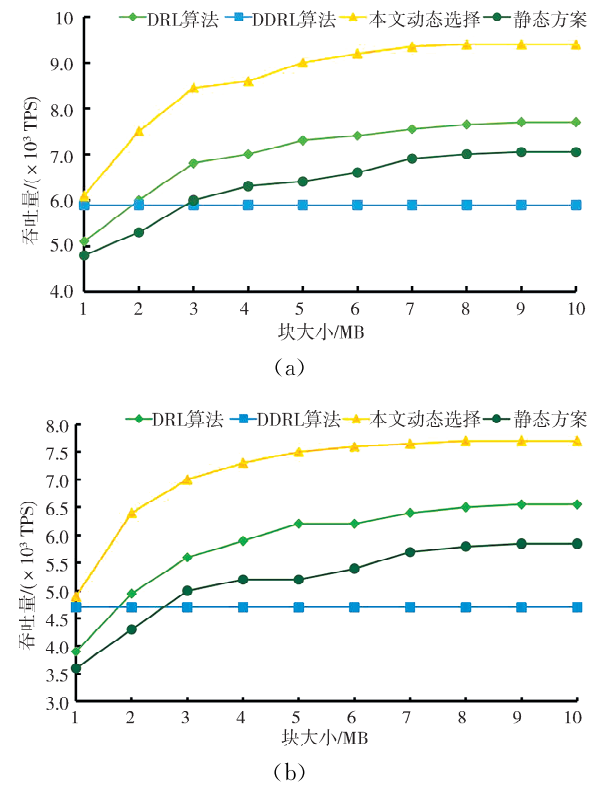


图 6 吞吐量与块大小限制关系
Fig. 6 The relationship of throughput and block size limits

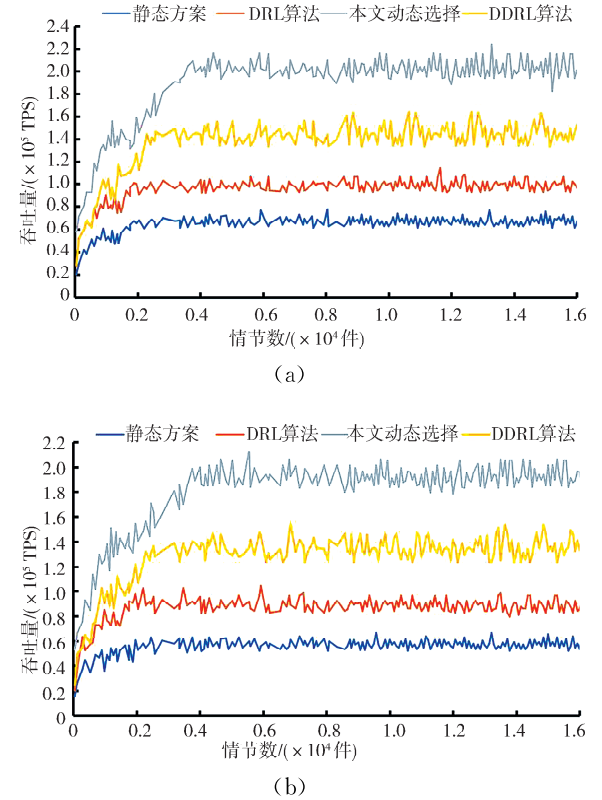


图 7 不同方案的吞吐量
Fig. 7 Throughput of different schemes

5 结 论

区块链去中心化、不可篡改等特点在一定程度上降低了区块链物联网系统进行信息交互的安全风险. 但区块链技术的通行量限制特点使其在很大程度上难以满足物联网场景下的高吞吐量业务需求. 本文提出一种最小损失函数算法, 动态调整区块大小和区块间隔, 使得在保证基于区块链的物联网系统延迟性的同时提高链上事务吞吐量. 仿真结果表明, 在不同的仿真场景下, 本文提出的算法能获得比基线更高的吞吐量. 下一步我们将考虑更多的共识协议, 根据用户的不同需求实现自适应的调整, 并将类似方案应用于特定的边缘计算案例.

参考文献:

[1] Dai H, Zheng Z, Zhang Y. Blockchain for internet of things: a survey[J]. IEEE J Internet Thing, 2019, 6: 8076.

[2] 李璞. 基于区块链技术增强物联网安全应用研究[J]. 财讯, 2020, 162.

[3] 何燕燕. 基于区块链的物联网技术应用[J]. 无线互联科技, 2020, 17: 21.

[4] 何正源, 段田田, 张颖, 等. 物联网中区块链技术的应用与挑战[J]. 应用科学学报, 2020, 38: 22.

[5] Du J, Zhao L, Feng J, *et al.* Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with min-max fairness guarantee[J]. IEEE T Commun, 2018, 66: 1594.

[6] 孙知信, 张鑫, 相峰, 等. 区块链存储可扩展性研究进展[J]. 软件学报, 2021, 32: 1.

[7] Qiu C, Yao H, Yu F R, *et al.* A service-oriented permissioned blockchain for the internet of things[J]. IEEE T Serv Comput, 2020, 13: 203.

[8] Guo F, Yu F R, Zhang H, *et al.* Adaptive resource allocation in future wireless networks with blockchain and mobile edge computing [J]. IEEE T Wirel Commun, 2020, 19: 1689.

[9] 毛志来, 刘亚楠, 孙惠平, 等. 区块链性能扩展与安全研究[J]. 信息网络安全, 2020, 20: 56.

[10] Feng J, Yu F R, Pei Q, *et al.* Cooperative computation offloading and resource allocation for blockchain-enabled mobile-edge computing: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE J Internet Thing, 2020, 7: 6214.

[11] 王旭, 甘国华, 吴凌云. 区块链性能的量化分析研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56: 55.

[12] Liu M, Yu F R, Teng Y, *et al.* Performance optimization for blockchain-enabled industrial internet of things (IIoT) systems: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE T Ind Electron Inform, 2019, 15: 3559.

[13] Liu M, Teng Y, Yu F R, *et al.* Deep reinforcement learning based performance optimization in blockchain-enabled internet of vehicle[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019.

[14] Fu X, Yu F R, Wang J, *et al.* Performance optimization for blockchain-enabled distributed network function virtualization management and orchestration[J]. IEEE T Veh Technol, 2020, 69: 6670.

[15] Luo J, Chen Q, Yu F R, *et al.* Blockchain-enabled software-defined industrial internet of things with deep reinforcement learning[J]. IEEE J Internet Thing, 2020, 7: 5466.

[16] Li L, Doroslovački M, Loew M H. Approximating the gradient of cross-entropy loss function [J]. IEEE Access, 2020, 8: 111626.

引用本文格式:

中 文: 刘云, 宋凯, 陈路遥, 等. 最小损失算法在区块链物联网中的优化研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 023002.

英 文: Liu Y, Song K, Chen L Y, *et al.* Optimization of minimum loss algorithm in blockchain internet of things [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 023002.