

文章编号:1007-5321(2021)02-0089-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-176

# 基于区块链的物联网智能终端协作计算方案

查煜坤, 智慧, 房小彤

(安徽大学 计算智能与信号处理(教育部)重点实验室, 合肥 230601)

**摘要:** 提出采用区块链技术为智能终端提供安全可靠的协作平台,用激励机制鼓励智能终端参与协作. 采用 Kuhn-Munkres 算法实现最优配对,充分调动计算资源;通过两阶段 Stackelberg 模型描述计算资源的交易过程,在保障公平性的同时实现计算能耗的优化. 采用信誉值证明的共识机制来减少挖矿造成的资源浪费,利用信誉值和资源币收益作为激励条件,鼓励智能终端参与协作,提高服务质量. 仿真结果表明,所提方案综合了协作双方的效用,不仅可以提供一个可信的交易平台,而且能降低总能量的消耗.

**关键词:** 物联网; 区块链; 协作计算; 信誉值证明机制

**中图分类号:** TN919.72

**文献标志码:** A

## Blockchain-Based Cooperative Computing Scheme for IoT Intelligent Terminals

ZHA Yu-kun, ZHI Hui, FANG Xiao-tong

(Key Laboratory of Computing Intelligent and Signal Processing (Ministry of Education), Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The blockchain technology is used to provide a safe and reliable cooperation platform for intelligent terminals, and a suitable incentive mechanism is provided to encourage intelligent terminals to participate in cooperative computing. Specifically, the proposed scheme uses the Kuhn-Munkres algorithm to achieve the optimal pairing and to fully mobilize the computing resources in the network, it also uses the two-stage Stackelberg model to describe the computing resource transaction process, which can optimize computing energy consumption while ensuring fairness. This scheme adopts the proof-of-reputation consensus mechanism to reduce resource waste caused by mining, used reputation and resource currency revenue as incentive conditions to encourage intelligent terminals to participate in cooperation and improve the quality of service. Simulation shows that the proposed scheme comprehensively considers the utility of the parties in cooperation, not only can provide a credible trading platform, but also can reduce the total energy consumption.

**Key words:** internet of things; blockchain; cooperative computing; proof-of-reputation mechanism

物联网中具有传感、处理数据和通信功能的智能终端设备通常是由电池支持的低功率设备,应用程序会消耗大量能量,限制了物联网网络运行的寿命. 智能终端共享资源是提高能量效率的有效方

程序会消耗大量能量,限制了物联网网络运行的寿命. 智能终端共享资源是提高能量效率的有效方

收稿日期: 2020-09-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(62001001);安徽省自然科学基金项目(1508085QF125);安徽省高校自然科学基金项目(KJ2016A042);安徽大学科研启动经费项目(01001770-10117700011)

**作者简介:** 查煜坤(1996—),男,硕士生.

**通信作者:** 智慧(1984—),女,硕士生导师, E-mail:zhihui\_0902@163.com.

式<sup>[1]</sup>. 现有研究大多设立受信任的中心机构,对网络中终端的可信度进行背书、存储和更新,解决终端间的信任问题. 区块链技术可以提供一个可靠的去中心化平台,解决信任中心故障的问题,从而适用于多种物联网的应用场景,如医疗服务<sup>[2]</sup>、智能交通<sup>[3]</sup>、工业物联网<sup>[4]</sup>. 简单有效的工作量证明机制(PoW, proof of work)可确保网络中的终端就分布式账本的一致性达成共识,而“挖矿”将会造成大量的资源浪费. 解决这一问题的现有方法是终端设备从服务器或云端购买计算资源以处理挖矿任务. 例如 Xiong 等<sup>[5-6]</sup>研究了计算资源交易过程中基于计算资源定价的最优资源管理. Xiong 等<sup>[7]</sup>进一步考虑多个云服务提供商之间的竞争关系,采用乘法器交替方向法优化资源交易双方的总效用. Li 等<sup>[8]</sup>提出一种边缘服务器和物联网终端设备之间资源交易的迭代双向拍卖方案. Kang 等<sup>[9]</sup>针对车辆边缘计算网络中的数据存储和数据分享业务设计了联盟区块链,优化系统的安全性. Zhang 等<sup>[10]</sup>通过前景理论方法权衡移动设备获取计算资源的风险和利润回报. Liu 等<sup>[11]</sup>设计了区块链驱动的工业物联网系统,采用深度强化学习技术,动态调整共识机制,并讨论了无线移动网络中挖矿任务的卸载模式决策以及对计算结果的缓存策略<sup>[12]</sup>. 但学者们未能从本质上解决 PoW 的由竞争挖矿带来的资源消耗问题.

Chai 等<sup>[13]</sup>提出了一种车联网中基于联盟区块链的资源共享方案,信誉值证明(PoR, proof of reputation)用机制代替挖矿任务. Qiao 等<sup>[14]</sup>同样采用 PoR 共识机制,针对物联网中移动设备之间进行协作计算的场景提出了区块链驱动的资源交易策略. 笔者提出的共识机制亦采用 PoR,以提高终端设备的能源效率,同时以信誉值作为激励机制鼓励终端设备分享资源.

综上所述,笔者提出了一种基于区块链的物联网智能终端协作计算方案(BCCS, blockchain-based cooperation computing strategy),主要贡献如下.

1) 采用区块链技术建立智能终端之间的信任基础,详述基于区块链的物联网智能终端协作计算方案的工作流程,即智能合约.

2) 共识机制采用更适用于智能终端能量受限场景的 PoR 共识机制,取代 PoW 共识机制,以避免挖矿问题造成巨大的能量消耗.

3) 将智能终端的名誉值和数字货币作为激励机制,鼓励智能终端参与协作计算,提高智能终端参

与协作计算的积极性.

## 1 系统模型与工作流程

区块链驱动的协作计算系统主要包括 1 个无线接入点(AP, access point)和  $I$  个智能终端设备,编号为  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_I\}$ . AP 依据信道条件等信息,解决终端之间的配对问题,提供必要的网络辅助信息. 依据是否有需要解决的计算任务,将终端设备分为  $N$  个任务所有者和  $M$  个资源提供者,二者的编号分别为  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}$  和  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_M\}$ . 而任务所有者计算任务  $A_n$  的输入数据大小为  $L_n$ ,完成截止期限为  $T_n$ . 系统中的任务所有者可以通过设备到设备(D2D, device to device)通信将计算任务部分卸载至资源提供者,以实现协作计算. 依据文献[15],计算能耗为

$$E_c^n = \frac{KL_n^3}{T_n^2} \quad (1)$$

其中  $K$  为由智能终端设备的有效切换容量和任务完成概率确定的计算能力常数因子. 通信的能耗为

$$E_t^n = \frac{\rho L_n}{g_{n,m}} \quad (2)$$

其中  $\rho$  为智能终端设备的传输能量系数,  $g_{n,m}$  为任务所有者与资源提供者之间的信道状态信息.

基于区块链的物联网智能终端协作计算方案的工作流程即自动执行的智能合约,包括 5 个步骤.

1) 系统初始化. 终端设备在受信任的 AP 上注册后成为系统中的合法用户,终端设备需向 AP 提交其作为资源提供者用于单次协作计算的计算能耗  $E_i$ . AP 用该用户的 IP 地址来标识其唯一身份;然后,将包括公共密钥和私有密钥的一对密钥发送给终端设备. 为了实现资源币的交易,设置终端设备的钱包地址  $W_i$ . 终端设备根据网络中终端设备的信誉平均值初始化新合法用户的信誉值  $R_i$ .

2) 基于 Kuhn-Munkres(KM)算法的协作配对. 在每个协作计算周期终端设备根据服务需求和资源可用性确定其角色,有计算任务的设备为任务所有者,能提供计算资源的设备为资源提供者. 任务所有者将协作计算申请发送至 AP,AP 将任务所有者与资源提供者之间的信道状态信息矩阵  $\mathbf{G} = (g_{n,m})_{N \times M}$ 、每个待执行计算任务的信息  $\{L_n, T_n\}$  以及每个资源提供者可用于单次协作计算的计算能耗输入基于 KM 算法的协作配对并执行,实现协作计算双方的最佳配对.

3) 基于两阶段 Stackelberg 博弈的计算资源交易。在确定每组协作计算配对后,进一步执行基于两阶段 Stackelberg 博弈的计算资源交易。确定资源币和计算资源后,任务所有者按照确定好的任务分配结果将部分计算任务卸载至资源提供者,由协作双方共同执行计算任务。

4) 资源币交易与信誉值的更新。当资源提供者准确地发回计算结果时,任务所有者被锁定的资源币自动转移到资源提供者的钱包地址;然后,任务所有者负责对资源提供者的信誉值进行评估,任务所有者将这些完整的资源交易记录和资源提供者的信誉得分及其签名广播给网络中所有的终端设备。

5) 执行基于 PoR 的共识过程。在经过由 AP 设定的区块生成周期后,由信誉评分最高的终端设备负责构造 1 个新区块,记录计算资源交易信息和智能终端的名誉值信息,不包含计算任务的具体信息;然后,广播新区块,以验证这些交易的合法性。若所有审核结果均正确,则根据时间戳将新区块放入区块链;若不正确,则由终端设备重新生成新区块。

## 2 协作配对过程及资源交易过程

### 2.1 基于 KM 算法的协作配对方案

任务所有者与资源提供者之间的适配度矩阵为  $S = \{s_{n,m}\}_{N \times M}$ ,设计  $s_{n,m}$  以衡量任务所有者和资源提供者之间的适配度。首先考虑资源提供者的信誉值,保证信誉高的资源提供者优先获取资源币收入,此外,引入信誉值可提高安全性;其次,考虑双方之间的信道状态;最后,考虑与计算能耗相关的资源提供者提供的协作计算输入比特数。

$$s_{n,m} = \begin{cases} \alpha(R_m) + \beta \left( g_{n,m} + \frac{l_{ava}^{n,m}}{l_{sys}^{n,m}} \right), & l_{ava}^{n,m} < l_{sys}^{n,m} \\ \alpha(R_m) + \beta(g_{n,m} + 1), & l_{ava}^{n,m} \geq l_{sys}^{n,m} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  分别为信誉值、信道、比特数在评估相互适合程度时的权重系数。

配对问题的目标是找到最佳的配对矩阵  $C = \{c_{n,m}\}_{N \times M}$ ,其中  $c_{n,m} \in \{0,1\}$ 。保障每个发送协作计算请求的任务所有者均能有相应的资源提供者与之配对,使得系统中的总适配度达到最大。该最优化问题表示为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_C \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M C_{n,m} S_{n,m} \\ \text{s. t. } & \text{C1: } c_{n,m} \in \{0,1\}, n \in \{1,2,\dots,N\}, \\ & m \in \{1,2,\dots,M\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{C2: } & \sum_{n=1}^N c_{n,m} \in \{0,1\}, \forall m \in \{1,2,\dots,M\} \\ \text{C3: } & \sum_{m=1}^M c_{n,m} = 1, \forall n \in \{1,2,\dots,N\} \end{aligned} \quad (4)$$

利用 KM 算法求解以上最优化问题 P1。KM 算法通过给每个任务所有者设置一个顶标,求完备匹配下的最大权匹配,算法复杂度为  $O(N^3)$ 。

#### 算法 1 KM 算法

初始化: 根据适配值矩阵  $S$  初始化资源提供者与任务所有者的顶标值。

阶段 1 对每个任务所有者依次执行如下步骤:

- ① 初始化交错树,用算法 2(匹配算法)为任务所有者寻找与之配对的资源提供者;
- ② 若未为任务所有者配对成功,则修改交错树内资源提供者与任务所有者的顶标值;
- ③ 重复步骤①②,直到为任务所有者配对成功;
- ④ 更新配对矩阵。

阶段 2 输出配对矩阵。

#### 算法 2 匹配算法

阶段 1 将任务所有者归入交错树中。

阶段 2 对每个资源提供者依次执行如下步骤:

- ① 判断资源提供者是否位于交错树中,若不是,根据顶标和适配值  $s_{n,m}$  判断是否可以构成配对;
- ② 若可构成配对,将资源提供者归入交错树中;
- ③ 若资源提供者已被配对,则利用算法 2 为资源提供者的原配对对象重新配对;
- ④ 若资源提供者未被配对或资源提供者的原配对对象重新配对成功,则任务所有者与资源提供者配对成功,返回配对成功标识,结束算法 2;
- ⑤ 若任务所有者与每个资源提供者均无法成功配对,返回配对失败标识。

### 2.2 基于两阶段 Stackelberg 博弈的计算资源交易方案

#### 2.2.1 两阶段 Stackelberg 博弈模型

1) 第 2 阶段——任务所有者的计算任务分配问题

首先,由式(1)推导得到资源提供者可协作任务所有者执行计算任务的最大输入比特数为

$$l_{ava}^{n,m} = \left( \frac{E_m T_n^2}{K} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

由文献[15]可得使协作计算总能耗最低的协作计算任务的输入比特数为

$$l_{\text{sys}}^{n,m} = \frac{L_n}{2} - \frac{\rho T_n^2}{3g_{n,m}L_nK} \quad (6)$$

任务所有者的效用函数表示为

$$U_{O_n} = \frac{KL_n^3}{T_n^2} - \frac{K(L_n - l_{\text{act}})^3}{T_n^2} - \rho \frac{l_{\text{act}}}{g_{n,m}} - pl_{\text{act}} \quad (7)$$

其中:  $l_{\text{act}}$  为实际卸载的计算任务输入比特数,  $p$  为单位比特资源币价格. 任务所有者决定实际协作计算的比特数, 以最大化自身的效用函数. 计算任务分配问题为

$$\begin{aligned} \text{P2: } \max_{l_{\text{act}}} &= \{U_{O_n}(l_{\text{act}}, p)\} \\ \text{s. t. } &\text{C4: } 0 \leq l_{\text{act}} \leq \min \{l_{\text{ava}}^{n,m}, l_{\text{sys}}^{n,m}\} \end{aligned} \quad (8)$$

## 2) 第1阶段——资源提供者的资源定价问题

类似于任务所有者的效用函数, 资源提供者的效用考虑其承担的额外能量消耗和资源币收入, 资源提供者的效用函数为

$$V_{P_m} = \frac{-KL_{\text{act}}^3}{T_n^2} - \frac{\rho l_{\text{act}}}{g_{n,m}} + pl_{\text{act}} \quad (9)$$

资源提供者的资源定价问题为

$$\begin{aligned} \text{P3: } \max_p & \{V_{P_m}(p, l_{\text{act}})\} \\ \text{s. t. } &\text{C5: } 0 \leq p \leq p_{\text{sys}} \end{aligned} \quad (10)$$

## 2.2.2 博弈的纳什均衡分析和问题求解

$U_{O_n}(l_{\text{act}}, p)$  关于实际卸载计算任务比特数  $l_{\text{act}}$  的一阶偏导数和二阶偏导数分别为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_{O_n}(l_{\text{act}}, p)}{\partial l_{\text{act}}} &= \frac{3K(L_n - l_{\text{act}})^2}{T_n^2} - \frac{\rho}{g_{n,m}} - p \\ \frac{\partial^2 U_{O_n}(l_{\text{act}}, p)}{\partial l_{\text{act}}^2} &= (-6) \frac{K(L_n - l_{\text{act}})}{T_n^2} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

因此,  $U_{O_n}(l_{\text{act}}, p)$  是关于  $l_{\text{act}}$  的严格凸函数. P2 存在唯一的最优解. 令  $\partial U_{O_n}(l_{\text{act}}, p) / \partial l_{\text{act}} = 0$ , 可得

$$l_{\text{act}} = L_n - \left[ \left( p + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3K} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10). 为简化求导公式, 令

$$A = \left[ \left( p + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3K} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ 可得}$$

$$\begin{aligned} \text{P4: } \max_A & V_{P_m}(A, l_{\text{act}}) = \\ & \frac{-K(L_n - A)^3}{T_n^2} + (L_n - A) \left( \frac{3KA^2}{T_n^2} - \frac{2\rho}{g_{n,m}} \right) \\ \text{s. t. } &\text{C3: } 0 \leq L_n - A \leq \min \{l_{\text{ava}}^{n,m}, l_{\text{sys}}^{n,m}\} \\ &\text{C4: } \frac{\rho T_n^2}{3g_{n,m}K} \leq A^2 \leq \left[ \left( p_{\text{sys}} + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3g_{n,m}K} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$V_{P_m}(A, l_{\text{act}})$  关于  $A$  的一阶偏导数和二阶偏导数分别为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_{P_m}(A, l_{\text{act}})}{\partial A} &= \frac{-3K(2A^2 - L_n^2)}{T_n^2} + \frac{2\rho}{g_{n,m}} \\ \frac{\partial^2 V_{P_m}(A, l_{\text{act}})}{\partial A^2} &= (-12) \frac{AK}{T_n^2} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$V_{P_m}(A, l_{\text{act}})$  关于  $A$  的二阶导数小于0, 且约束条件均为凸集, 所以最优化问题 P2 和 P3 分别有最优解, 则资源交易问题经过有限的迭代可获得唯一的纳什均衡. 因此, 可得资源提供者的资源定价策略和任务所有者的任务分配策略为

$$p = \begin{cases} 0, & \frac{3KL_n^2}{2T_n^2} < 0 \\ \frac{3KL_n^2}{2T_n^2}, & 0 \leq \frac{3KL_n^2}{2T_n^2} \leq p_{\text{sys}} \\ p_{\text{sys}}, & p_{\text{sys}} < \frac{3KL_n^2}{2T_n^2} \end{cases} \quad (15)$$

$$l_{\text{act}} =$$

$$\begin{cases} 0, & L_n - \left[ \left( p + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3K} \right]^{\frac{1}{2}} < 0 \\ L_n - \left[ \left( p + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3K} \right]^{\frac{1}{2}}, & 0 \leq L_n - \left[ \left( p + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3K} \right]^{\frac{1}{2}} \leq \min \{l_{\text{ava}}^{n,m}, l_{\text{sys}}^{n,m}\} \\ \min \{l_{\text{ava}}^{n,m}, l_{\text{sys}}^{n,m}\}, & \min \{l_{\text{ava}}^{n,m}, l_{\text{sys}}^{n,m}\} < L_n - \left[ \left( p + \frac{\rho}{g_{n,m}} \right) \frac{T_n^2}{3K} \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (16)$$

## 2.3 用户信誉值评估机制

通过设置合理的用户信誉值评估机制, 评估任务所有者对资源提供者的计算结果和效率, 以防止恶意的资源提供者提供低质量的协作服务. 定义实时贡献值以反映当前资源提供者在协作计算中的贡献程度, 如

$$C_m = \lambda_t \frac{T_n}{t_{\text{act}}} + \lambda_l \frac{l_{\text{act}}}{l_{\text{sys}}^{n,m}} \quad (17)$$

其中  $\lambda_t$  和  $\lambda_l$  为权重参数. AP 设置区块的生成时间间隔, 由信誉值最高的用户将交易记录和信誉值信息打包上链, 以获取打包奖励. 信誉值是用户长期参与协作计算的累积实时贡献值, 如

$$R_m = \sum_{t=1}^T \eta^t C_m(t) \quad (18)$$

其中  $\eta$  表示折扣因子.  $\eta$  越高, 表示当前  $C_m$  的值对用户信誉值  $R_m$  的影响越大.



3 性能仿真与分析

将 BCCS 与文献[15]中的方案进行对比,包括最优信道资源提供者选择 (BCRS, best channel RP selection) 策略和权衡公平性策略 (WFS, weighted-fairness-strategy). 此外, 随机资源提供者选择 (RRS, random RP selection) 策略是指 AP 为任务所有者随机选择资源提供者进行协作计算的配对.

图 1 所示为不同方案下恶意终端参与协作计算的次数. 设恶意终端的恶意行为概率为  $\mu$ , BCCS 相对于 BCRS 策略和 RRS 有效地减少了恶意终端参与协作计算的次数,这是由于在配对过程中,设计适配度函数时考虑到了资源提供者的信誉值,而资源提供者的信誉值由其所提供的服务质量所确定. 随着资源提供者恶意行为概率  $\mu$  的不断提高,其参与协作计算的次数越来越少. 说明系统可以有效地甄别恶意节点,并防止其参与协作影响系统的能耗性能.

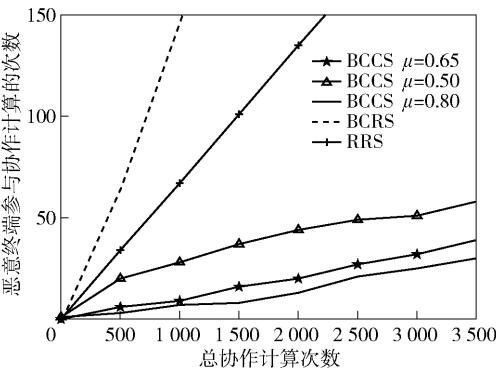


图 1 不同方案下恶意终端参与协作计算的次数

图 2 所示为终端设备信誉值与资源币收入之间的关系. 首先,系统保障信誉值相对较高的终端设备可获得更多的资源币收入,这是因为适配度函数的设置倾向于让信誉值高的资源提供者更多地参与协作计算. 因此,为了提高信誉值,资源提供者需要提供高质量的协作计算服务,从而在下一个计算任务的配对过程中获得优势,以便成功配对,获取数字货币,在自身产生计算任务时购买计算资源,减少自身能耗,构成良性循环. 此外,权重参数  $\alpha$  的降低会降低信誉值高的终端设备资源币收入权益的保障. 图 3 所示为权重参数  $\beta$  与系统总能耗之间的关系,权重参数  $\beta$  的提高降低了系统的总能耗,有利于延长系统生命的周期.

图 4 显示了任务数与总能耗之间的关系. 首先,所提出的 BCCS 的能耗表现优于其余 3 种方案,

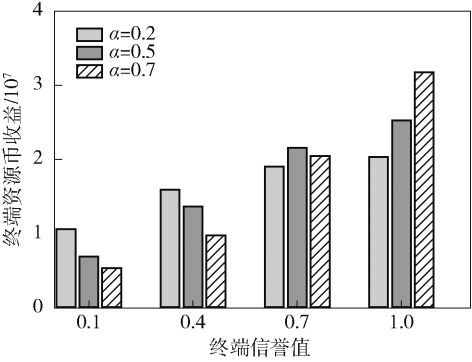


图 2 终端名誉值与资源币收益之间的关系

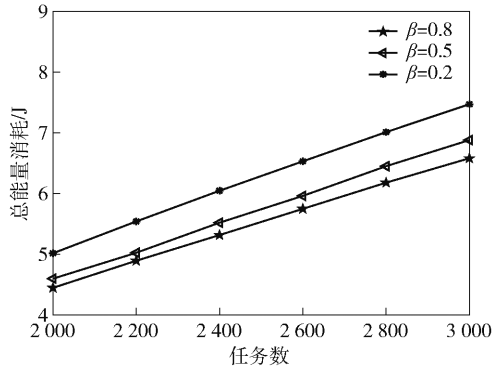


图 3 权重参数  $\beta$  与系统总能耗之间的关系

WFS 方案为了保障每个智能终端设备能从协作计算中获益,忽略了对能耗的优化. BCCS 和 BCRS 策略均在配对过程中对信道条件进行了衡量, BCCS 进一步衡量了资源提供者能否为任务所有者提供足够的计算资源,以完成计算业务,在能耗上相较于 BCRS 策略实现了进一步的优化.

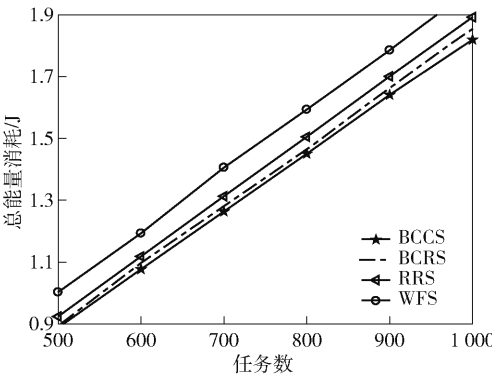


图 4 不同协作方案下系统的总能耗对比

图 5 所示为协作方案的公平性性能对比. RRS 策略可以实现绝对的公平, WFS 次之, BCCS 也体现了较高的公平性性能,且随用户总数的增加,趋势不变. BCRS 策略在选取资源提供者时仅仅对信道条件进行了衡量,而在公平性上的保障相对较差,呈现

了较大的波动,极端情况下可能会导致某个智能终端设备的负效用. 在 BCCS 中,设计适配度函数综合考虑三方面的因素,每个终端各自有参与协作计算的自身优势. 在每个区块生成之后,智能终端设备可根据自身的计算资源和资源币收入情况,向 AP 更新自身作为资源提供者可用于单次协作计算的计算能耗.

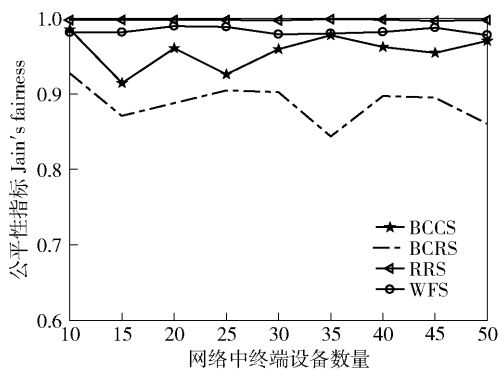


图5 不同协作方案的公平性性能对比

## 4 结束语

提出了一种基于区块链的物联网智能终端协作计算方案,引入资源币收益和信誉值共识机制,激励智能终端设备参与协作计算,配对过程采用的 KM 算法可实现最优配对,且降低了算法复杂度. 在资源交易过程中综合考虑了实际应用场景中协作双方各自的协作效用. 相对于其他方案,所提方案可以在保障一定公平性性能的同时,进一步降低系统的能量消耗.

### 参考文献:

- [1] Zhi H, Zha Y, Fang X, Cross-layer optimal power allocation scheme for two-way relaying system with amplify-and-forward policy[J]. IEICE Transactions on Communications, 2019, E102-B(8): 1741-1750.
- [2] Xu J, Xue K, Li S, et al. Healthchain: a blockchain-based privacy preserving scheme for large-scale health data[J]. IEEE Internet Things J, 2019, 6(5): 8770-8781.
- [3] Zhou Z, Wang B, Guo Y, et al. Blockchain and computational intelligence inspired incentive-compatible demand response in internet of electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2019, 3(3): 205-216.
- [4] Yao H, Mai T, Wang J, et al. Resource trading in blockchain-based industrial Internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6):

3602-3609.

- [5] Xiong Z, Feng S, Niyato D, et al. Optimal pricing-based edge computing resource management in mobile blockchain[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City: IEEE, 2018: 1-6.
- [6] Xiong Z, Feng S, Wang W, et al. Cloud/Fog computing resource management and pricing for blockchain networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4585-4600.
- [7] Xiong Z, Kang J, Niyato D, et al. Cloud/edge computing service management in blockchain networks: multi-leader multi-follower game-based ADMM for pricing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2020, 13(2): 356-367.
- [8] Li Z, Yang Z, Xie J, et al. Computing resource trading for edge-cloud-assisted Internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3661-3669.
- [9] Kang J. Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4660-4670.
- [10] Zhang K, Cao J, Leng S, et al. Mining task offloading in mobile edge computing empowered blockchain[C]//2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT). Tianjin: IEEE, 2019: 234-239.
- [11] Liu M, Yu F, Teng Y, et al. Performance optimization for blockchain-enabled industrial Internet of things (IIoT) systems: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3559-3570.
- [12] Liu M, Yu F, Teng Y, et al. Computation offloading and content caching in wireless blockchain networks with mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11008-11021.
- [13] Chai H, Leng S, Zhang K, et al. Proof-of-reputation based-consortium blockchain for trust resource sharing in Internet of vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 175744-175757.
- [14] Qiao G, Leng S, Chai H, et al. Blockchain empowered resource trading in mobile edge computing and networks[C]//2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019: 1-6.
- [15] Sheng Z, Mahapatra C, Leung V, et al. Energy efficient cooperative computing in mobile wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2018, 6(1): 114-126.