

基金项目：国家重点研发计划项目（项目编号 2017YFE0132100）；清华-丰田研究基金；北京信息科学与技术国家研究中心项目（项目编号 BNR2020TD01009）

共识边缘计算及其在能源互联网中的应用

王同贺¹，华昊辰²，曹军威³

(1. 清华大学, 北京市 100084; 2. 河海大学, 江苏省南京市 210098; 3. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京市 100084)

摘要：边缘计算和共识是分布式计算领域的两个重要研究课题。边缘计算将一部分资源下放到靠近终端设备的边缘侧以提高计算效率和质量，共识通过实现分布式个体状态的一致性为分布式系统提供安全保障。本文在简要综述相关文献的基础上，总结和分析了边缘计算与共识的互惠关系：边缘计算架构为共识算法研究提供了理论模型的创新，共识为边缘计算提供了理想的系统安全性。本文将边缘计算和共识算法有机地进行结合，提出“共识边缘计算”的概念，在能源互联网的背景下对这种结合的应用进行展望性的分析，并进一步列举可能的发展方向。

关键词：边缘计算；共识；能源互联网；物联网；分布式算法；区块链

Consensus Edge Computing and Its Applications in Energy Internet

WANG Tonghe¹, HUA Haochen², CAO Junwei³

(1. Tsinghua University, 100084, Beijing; 2. Hohai University, 210098, Nanjing, Jiangsu;

3. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, 100084, Beijing)

ABSTRACT: Edge computing and consensus are two important research topics in the field of distributed computing. Edge computing delegates some resources to the edge near terminal devices improve the efficiency and quality of computing, while consensus provides security for distributed systems by achieving the consistency among the states of distributed individuals. Based on a brief review of related literature, this paper summarizes and analyzes the reciprocity between edge computing and consensus: the edge computing architecture provides innovation for the theoretical model of consensus study, and consensus provides desirable security for edge computing systems. In this paper, edge computing and consensus algorithm are combined organically, and the concept of “consensus edge computing” is established. The application of this combination is prospectively analyzed under the background of Energy Internet, and then possible development directions are enumerated.

KEY WORDS: edge computing; consensus; Energy Internet; Internet of Things; distributed algorithms; blockchain

中图分类号：

0 引言

边缘计算（Edge Computing）是一种分布式计算模式，它通过将计算资源和数据存储下放到网络边缘（即靠近有计算需求的用户端），以提高计算的响应效率。边缘计算的概念起源于内容交付网络^[1]，它通过在靠

近用户端的边缘服务器上部署网页和视频内容缓存服务来提高加载效率。与传统的云计算（Cloud Computing）相比，边缘计算减少了数据传输耗时，缩短了服务响应时间，减轻了网络宽带的负担^[2-3]。在大数据（Big Data）和物联网（Internet of Things, IoT）逐

渐普及的社会大环境下,边缘计算的去中心化特点不仅弥补了云计算暴露出的计算能力不足的问题^[4],并且能够满足物联网对响应速度和服务质量较高的要求^[5]。

而共识(Consensus)问题^[6]是分布式计算研究中最热门的课题之一。分布式系统中的个体会接收到一些请求,共识算法需要对这些请求进行认可,从而使所有个体的状态达成一致。经典共识算法在实际中有许多应用,如为异步系统提供同步信息^[7-9],分布式系统中的故障检测与恢复^[10-12],分布式数据库系统的一致性维护^[13-15]等。

区块链技术的问世,极大地促进了分布式共识算法研究的进展。区块链是一种基于共识算法的链式分布式记账技术(Distributed Ledger Technology, DLT)。比特币和以太坊使用工作量证明(Proof-of-Work, PoW)^[16]作为共识层算法,Hyperledger Fabric平台则使用传统的实用拜占庭容错(Practical Byzantine Fault Tolerance, PBFT)共识算法^[17]。

在能源互联网(Energy Internet)场景中,共识算法和边缘计算都有着广泛的应用。能源互联网是一种通过结合能源系统和信息通信技术来解决能源相关问题的技术^[18]。分布式共识以区块链为载体,为去中心化能源交易、物联网自动化管理、碳认证和交易、电动汽车交通等分布式能源系统提供安全保障^[19-22];边缘计算可以借助可再生能源微网技术供能以减少对一次能源的消耗^[23],同时在智能制造、智慧城市、城市能源管理、车联网(Internet of Vehicles, IoV)信息与能量交互等场景中发挥着重要的作用^[24-27]。

尽管边缘计算和共识各自扮演着重要的角色,但明确地将这两者结合起来的的文章或项目却不多。本文则尝试将两者有机地结合起来,并首次提出“共识边缘计算”的概念。详细地,本文有以下点贡献:

- 本文基于对边缘计算和共识算法研究的简要总结,正式提出“共识边缘计算”的概念,强调“共识边缘计算”并非是边缘计算与共识算法的简单结合体,而是充分利用二者互惠关系的系统;
- 本文从共识为边缘计算提供安全保障

和边缘计算为共识算法提供模型创新两种角度,描述“共识边缘计算”的几种具体实现形式;

- 本文基于能源互联网场景,对“共识边缘计算”的应用方向进行展望性分析。

本文的组织如下:第1章介绍边缘计算的架构以及边缘计算解决的问题;第2章介绍分布式共识算法所研究的问题及在可扩展性上面面临的挑战;第3章剔除“共识边缘计算”的概念,对其两种具体实现形式进行详细描述;第4章展望“共识边缘计算”在能源场景下的应用;第5章对本文进行总结,并在此基础上提出未来相关研究的思路。

1 边缘计算

本章将描述通用的边缘计算模型的层级框架结构,并简要总结边缘计算所研究的问题。

1.1 边缘计算架构

边缘计算的架构通常为三层结构,自上而下分别为云(Cloud)、边(Edge)、端(End)^[28]。如图1所示。

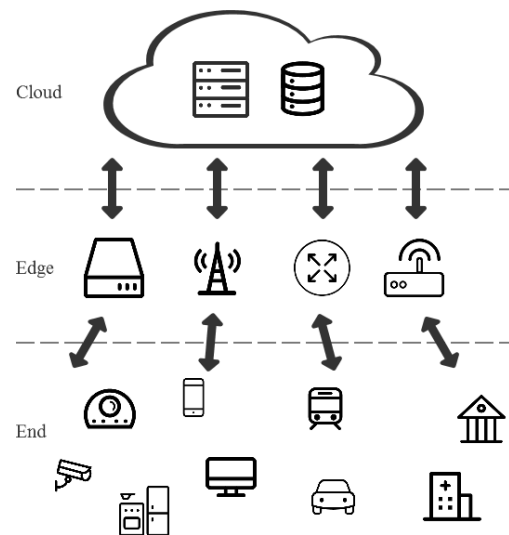


图1 边缘计算架构

Fig. 1 Architecture of Edge Computing

最上层为云层,即传统的集中式云服务器,有着强大的计算能力和存储资源。中间层为边缘层,一般由网关、路侧节点、边缘服务器等组成,具有一定的计算能力和储存能力,可以执行部分从云层下放的任務。最下层为终端层,包含各类数字化设备和传感

器设备，仅具备有限的计算和储存能力。

该计算模型将本由云层完成的部分或全部任务下放到终端附近的边缘层，缩短了数据传输距离和时间，提高了服务的终端响应速度。同时，边缘层可以对终端设备采集的数据进行预处理，剔除大量无效数据和错误数据，大大缓解云服务器的压力。

1.2 边缘计算研究的问题

物联网是边缘计算的主要应用场景，物联网的发展衍生了诸如车联网、智能家居、智慧城市、智能制造、智能电网等研究领域。在这些场景中，设备的资源有限，但往往又对实时性和响应速度有着很高的要求。边缘计算支持终端设备将部分或全部任务卸载到边缘设备执行，一定程度上满足了物联网场景的需求。这个过程叫做**计算卸载**（Computation Offloading）^[29]。

计算卸载是边缘计算研究的主要问题，它将决定是否终端设备进行卸载操作、卸载多少、卸载到哪些边缘节点，以及边缘设备何时需要进一步将任务上传至云层中执行。由于边缘设备的资源与强大的云服务器相比仍然是有限的，因此合理分配计算、存储、网络资源以及均衡负载在边缘计算中也是至关重要的^[30]。另外，物联网或车联网系统中存在着大量的公共单元（如边缘服务器、路侧单元等）。如何保障计算卸载过程中公共单元和使用公共单元的设备的隐私和信息安全将是一个巨大的挑战^[31-32]。

2 分布式共识算法

本章将详细介绍共识算法所研究的问题，并描述共识算法研究所面临的可拓展性方面的挑战。

2.1 分布式共识算法所研究的问题

在分布式共识算法中，网络节点将接收到的请求提交给所有节点，并通过共识算法共同决定是否认可该请求。共识算法具有以下三种性质^[33]：

- **合法性**：节点认可的请求必须是某个节点提交的请求；
- **一致性**：所有节点对请求的决定（认可或否决）是相同的；
- **终止性**：共识需在有限时间内完成。

下面将详细介绍共识算法在分布式算法领域中所研究的两个问题：崩溃/拜占庭容错与 FLP 不可能性。

2.1.1 崩溃/拜占庭容错

为描述实际分布式系统可能遇到的故障，共识算法所基于的理论模型常常假设网络节点会发生两类可能导致系统运行偏离预期结果的错误：崩溃错误和拜占庭错误。

绝大多数经典共识算法（如 Paxos^[34]、Raft^[35]等）会假设节点会发生崩溃错误，这种错误可以使节点进程完全停滞。在发生崩溃错误的情况下依然能实现共识的算法叫**崩溃容错**算法。类似地，能在节点发生拜占庭错误的情况下解决共识的算法叫**拜占庭容错**（Byzantine Fault Tolerance, BFT）算法。发生拜占庭错误的节点可能执行任意操作来打破系统的一致性^[36]，拜占庭错误不仅可能造成系统的混乱，造成的资源和资金的损失也是无法预期的。区块链一般要求共识层算法是拜占庭容错的，如工作量证明^[16]、PBFT^[17]等。

2.1.2 FLP 不可能性

异步系统是分布式算法研究中的一种重要的系统模型。在这种系统中，不同节点完成同一操作需要的时间可能会不同。Fischer-Lynch-Paterson (FLP) 不可能性定理证明，若异步系统出现了崩溃/拜占庭错误，则可以解决**分布式共识的确定性**算法是不存在的^[37]。为规避 FLP 不可能性，后续研究中常添加一些额外的假设，保证异步系统不会因节点错误而停滞，使得分布式容错共识可解。

最常用的方法是添加**部分同步**假设，即假设在系统稳定后，未发生错误节点间的信息传输在有限的时间内完成。Zyzyva^[38]、Ouroboros^[39]、Honeybadger^[40]等算法使用部分同步假设，将算法的重点放在解决拜占庭错误上。另外，将终止性要求放宽为**概率终止性**（即有限的时间内完成共识的概率随时间趋近于 1）也是一种常见做法。区块链中的工作量证明算法就是通过让节点求解高计算成本的哈希问题，将区块链分叉概率降至极低，从而保障系统的一致性。这个过程

被称为“挖矿”，参与挖矿的节点也叫做“矿工”。

2.2 共识算法所面临的可扩展性上的挑战

随着人们对分布式共识算法研究的深入，共识算法面临着越来越多的问题与挑战，如请求冲突问题、信息复杂度高、可扩展性低、网络、计算和存储资源消耗高等。其中可扩展性低的问题是最显著的。

可扩展性是衡量分布式系统是否能大规模应用的指标。随着系统规模的增加，算法效率降低程度越小，系统可扩展性越高。拜占庭容错共识算法大多基于 PBFT 算法，仅能应用于小规模的系统，可扩展性普遍较低^[38]。近年来问世的众多共识算法尝试不同的方法来提高系统可扩展性，但这些方式往往又会衍生出其他问题（详见表 1）。因此，解决可扩展性低的问题也是共识问题面临的巨大挑战。

表 1 共识算法为提高可扩展性所采取的方法及衍生出的问题

Table 1 Methods for consensus algorithms to improve scalability and problems arising

算法	提高可扩展性的方法	衍生出的问题
HoneyBadger ^[40]	使用门限签名提升实施拜占庭错误的难度	需要中心化的可信的密钥分发者，概率终止性
Hashgraph ^[41]	通过同步 Gossip 历史推测共识投票结果	同步 Gossip 历史需要传输大量信息
Zyzyva ^[38]	降低信息复杂度至 $O(n)$ (n 为系统节点总数)，使用推测性执行减少客户端延时	客户端出现拜占庭错误时无法达成共识
SACZyzyva ^[42]	用可信的单一活跃计数避免应对客户端错误需要的节点冗余	依赖于 Intel 的可信执行环境 TEE
BFT-RDMA ^[43]	信息传输使用远程直接内存访问 (RDMA) 代替 TCP	要求所有节点支持 RDMA 硬件
PhyxDB ^[44]	去掉首节点以减少请求堆积	发生请求冲突时请求失败率高
Algorand ^[45]	只有被随机选为投票委员的节点参与投票	概率终止性
Trust-PBFT ^[46]	建立信用机制，仅用信用值高的部分节点完成共识	降低了系统的去中心化程度

3 共识边缘计算

基于以上对边缘计算和共识研究的分析和总结，本文在此提出“共识边缘计算”的概念：“共识边缘计算”是一种融合了边缘计算技术和共识机制的分布式系统。这种融合并非只是将边缘计算与共识算法简单合并，而是通过两种方式进行有机结合：利用共识为边缘计算保障安全，以及基于边缘计算框架为共识提供模型的创新。本章将针对这两种方式进行详细的阐述。

3.1 共识为边缘计算保障安全

本小节将介绍两种使用共识机制保障安全的边缘计算系统，一种是基于区块链的区块链即服务系统，另一种则是“去区块链化”的边缘数据中心。

3.1.1 区块链即服务

近年来，基于共识实现信息透明、信息安全、信息不可篡改的区块链，被广泛应用在了各个领域，边缘计算也不例外。文献[47]提出在移动边缘网络平台上构建区块链即服务 (Blockchain-as-a-Service, BaaS) 系统，保障计算卸载过程的安全性，系统结构如图 2 所示。

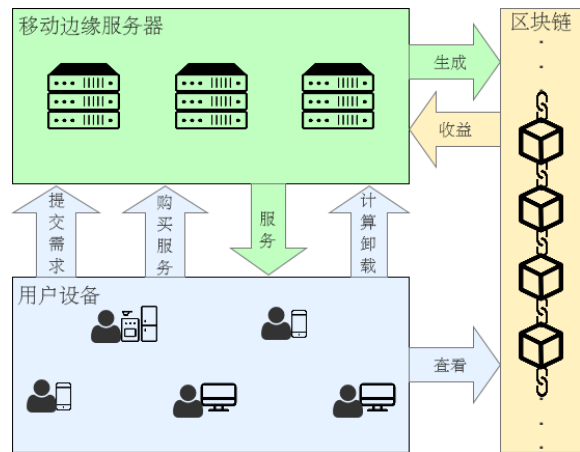


图 2 使用区块链即服务的计算卸载系统

Fig. 2 Computation Offloading System Using Blockchain-as-a-Service

当用户设备需要进行计算卸载时，先向移动边缘服务器提交计算卸载需求和服务交易请求。交易成功后，用户可以将计算任务卸载到移动边缘服务器，同时移动边缘服务器将交易信息和卸载记录保存到区块链

中。区块链中储存的信息不仅可以在边缘服务器之间共享，也允许用户查询。参与区块生成的边缘服务器通过工作量证明共识算法消耗资源，可以赚取额外的收益。

除了计算卸载，其他基于边缘计算的任务都可以通过类似图 2 的系统，将区块链良好的安全性质添加到边缘计算之中。如文献 [48] 使用区块链，借助工作量证明对数据进行审计，从而在车辆边缘计算网络中实现安全高效的数据共享。

3.1.2 边缘数据中心

随着边缘计算的不断推广，边缘数据中心应运而生。类似地，边缘数据中心就是将传统集中式的数据中心分散部署在靠近的用户终端的边缘层，从而支持高带宽和低延时的边缘计算服务^[49]。作为分布式数据库的一种特殊形态，边缘数据中心同样可以将共识算法应用于一致性维护、故障检测与维护等场景。

文献 [50] 提出了一种基于边缘数据中心的共识中间设备，这种带有拜占庭容错机制的中间设备可以在服务供应商与用户之间缺少相互信任的情况下，仍然为用户移动设备提供边缘网络服务。

除此之外，文献 [51] 描述了一种使用共识算法的虚拟同步模型库，帮助软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 同步分布式控制器状态。SDN 是一种网络虚拟化的系统架构，分为控制平面和数据平面。这里的控制平面则包含了根据全网状态定义数据转发规则的分布式控制器，数据平面则是记录控制器状态的边缘数据中心。文献中的虚拟同步模型库使用 Paxos 或 Raft 共识算法对边缘数据中心的控制器状态数据进行同步，这种虚拟化信息同步可以更好地支持控制器规则的动态调整，提高系统的容错能力并缓解效率上的瓶颈。

3.2 边缘计算为共识提供模型创新

不同于分布式共识算法的经典理论模型，边缘计算架构中位于不同层级的设备是异质的，资源、计算能力、功能都会有所不同。因此，边缘计算架构下的共识算法需要对基础的理论模型进行创新。

3.2.1 利用云解决 FLP 不可能性

终端设备可以将共识任务卸载到边缘层完成，但由于边缘层设备数量较多且分布较广，需要靠云服务层进行周期性信息同步。这种云边协同的模式，本质上就是利用中心化的云服务器实现异步系统的部分同步，从而规避 FLP 不可能性。

EdgeCons^[52] 是基于边缘计算架构的客户端操作事件排序系统，边缘设备通过 MultiPaxos^[53] 共识算法完成排序任务，而且无法在边缘快速解决的共识实例会进一步卸载到云端来完成。Nomad 系统在 EdgeCons 的基础上，进一步利用云边协同完成共识任务的地域间负载均衡^[54]。

3.2.2 分级共识

由于边缘设备数量多且分布广，边缘层往往会按地域划分为若干簇，不同簇之间的设备不能直接进行点对点信息传输，只能通过云作为中转来完成。这种设计考虑到基础设施建设上的难度，为全部边缘设备建立点对点通信也是不现实的。

移动边缘计算模式的可靠共识 (Reliable Consensus of Mobile Edge Computing Paradigm, RCMEC) 是首个可以在这种分级式的边缘计算架构下解决拜占庭共识问题的算法 (如图 3 所示)^[55]。该算法将边缘层的设备按地理位置分簇，先在簇内边缘设备之间达成共识，再将共识结果同步给云服务层。如有需要，共识结果也会下发至其他簇的边缘设备及终端设备。

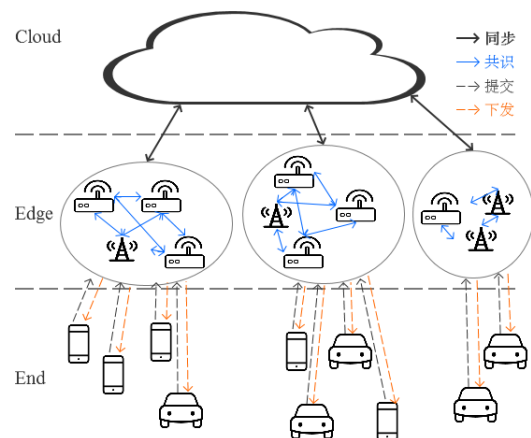


图 3 分级共识

Fig. 3 Hierarchical Consensus

与传统的共识相比，这种分级共识排除

了现实中没有必要且不可能实现的不同簇边缘设备间的点对点信息传输,降低了共识算法的信息复杂度,从而提高了系统的可拓展性。事实上,文献^[56]从理论上证明,这种分级结构可以将PBFT算法的信息复杂度从 $O(n^2)$ 降低至 $O(nk \cdot \log_k n)$,其中 n 为边缘设备总数, k 为最大簇内设备数目。

3.2.3 有向无环图技术

物联网是边缘计算典型的应用场景。文献[57]总结了20余种常见的共识算法,但“非常”适用于物联网的却寥寥无几。其主要原因在于,共识的结果是将所有请求全序化,分布式地解决这种全局问题有很大难度,且常见的共识算法往往需要消耗大量的存储、计算、网络资源,吞吐量低,响应时间长。这些都与物联网的低资源消耗和高响应效率的需求存在冲突。

为了更好地满足物联网场景的要求,越来越多学者开始研究基于有向无环图

(Directed Acyclic Graph, DAG)的共识算法。有向无环图技术主要通过支持请求并行处理,将共识的结果从全序关系放宽为偏序关系,从而提高共识系统的效率和可拓展性。以Tangle算法^[58]为例,新提交的请求按概率选择两个旧的请求进行认可,认可时需要求解类似工作量证明的但难度相对较低的哈希问题。如果将每个请求视为一个顶点,用有向边代表请求之间的认可关系,则Tangle算法的结果就形成了如图4所示的有向无环图。

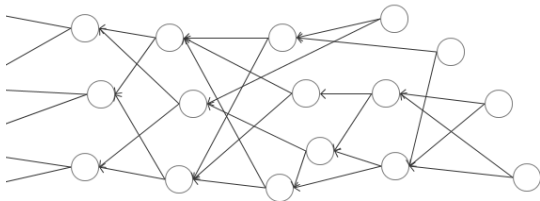


图4 Tangle算法的有向无环图结构

Fig. 4 The DAG Structure of Tangle

类似的算法还有ONLAY^[59]、Fantômette^[60]、Byteball^[61]等。这些基于DAG的算法虽然对共识算法的一致性要求有所折衷,但处理请求的效率得到了明显提升,增强了分布式系统的可拓展性,因此也更加符合物联网场景的要求。近几年,IOTA^[62]、PHANTOM^[63]等基于DAG的DLT技术的问世,有效地解决了区块链的链式结构对物联网不友好的难题,极大地促进了DLT技术的多元化发展^[64]。

4 “共识边缘计算”在能源互联网中的应用展望

本章将以能源互联网为背景,详细对“共识边缘计算”系统的应用进行展望性分析。

4.1 低能耗物联网区块链

物联网区块链在能源互联网中有着非常多的应用。例如,文献[65]中的路侧单元和本地聚合器通过共识算法对数据和能源贡献进行审计,可以提高车联网信息和能量交互过程的可追溯性和透明性。类似地,文献[66]描述了一种使用区块链研发的概念证明系统,它使用基于激励的共识算法来为家庭用电量、用户行为、环境感知等数据提供真实性验证信息,而这些数据随后会进入人工智能引擎来完成数据分析和安全风险预报。

类似的应用还有很多,其中以太坊是这些项目与工程使用的主流区块链平台,因此以太坊使用的工作量证明成为了主流共识算法^[67]。然而,完成工作量证明算法所需的电力、储存、硬件设备等资源消耗却是无法忽视的。据估计,比特币公司年均电力消耗在34太瓦·时左右,平均每确认一个区块消耗250千瓦·时的电能,这相当于美国一户普通家庭一周的用电量^[68]。虽然BaaS系统可以解决物联网终端设备计算能力和资源不足的问题,但这种解决方案只是将能源消耗从终端“转嫁”至边缘层或云层,系统整体的能源消耗并未减少甚至可能增加(如计算卸载过程中的耗能)。因此,越来越多研究和项目将优化系统整体的用能效率作为主要目标。

这个目标可以通过使用基于低能耗共识算法的区块链来实现,如文献[69]中的去中心化能源交易系统采用基于资金的权益证明算法替代工作量证明。文献[70]则自主研发了低能耗的鉴定证明算法,通过引入少量可靠的节点建立起一套认证体系,并且使用基于鉴定证明的区块链对边缘计算系统实施去中心化的访问控制。这种低能耗的共识算法不但可以加快生成区块的速度,也能提升系统的灵活性和可拓展性。

4.2 轻量分布式记账技术

区块链集成了点对点传输、DLT 技术、智能合约等多种信息通信技术，但有不少文献中的能源系统也仅仅用到了区块链的分布式记账功能^[71-76]。这种情况下，部署一套完整的区块链系统反而会大大增加系统的复杂度，降低项目的可行性。因此，开始有研究尝试并提倡“去区块链化”，仅使用基于信息加密和共识算法的**轻量 DLT 技术**，满足对去中心化、信息安全、信息共享、信息不可篡改等性质的需求，降低系统的复杂程度^[77]。

文献[78]提出在可再生能源微网中加入轻量 DLT 技术，通过共识算法即可保障微网中个体安全地进行数据操作和信息交换。该文献提出的微网结构还加入了边缘计算层，承担微网中部分数据储存、预处理、分析等任务。在工业物联网场景中，基于共识的轻量 DLT 技术可以协助搭建分布式认证框架，用于对边缘层设备进行安全认证，防止对生产机器的恶意定向网络攻击^[79]。

4.3 能源 DAG 技术

区块链与有向无环图是两种不同的 DLT 技术，二者的区别不仅限于共识结果是全序结构还是偏序结构。事实上，IOTA 是一种免区块 DAG 系统，它可以将交易信息直接记入账本，无需生成区块。

免区块 DAG 的优点在于，每个个体都可以是交易的记录者，可以免去区块链中因委托矿工生成区块而产生的中间费用，同时也克服了由于区块大小限制造成的交易延时。文献[80]指出，这与去中心化能源交易（或 P2P 能源交易）的无中间费用和高效率交易的目标是一致的。该文献同时还提出了一种基于 IOTA 的 P2P 能源交易平台（如图 4 所示），支持家庭用户间的周期性能源交易。

除此之外，在智能充电基础设施建设领域，通过在充电桩与电动汽车之间的缆线可以实现机器对机器（Machine-to-Machine, M2M）交易和数据交换的自动化，而且这种基于 IOTA 交易平台的充电桩已在社区内试验性投入使用^[81]。M2M 互动模式的有

方面的优点，一方面它无需建立传统的网络传输协议或设施，另一方面减少了人工介入的环节，因而更经济、安全、高效^[82]。

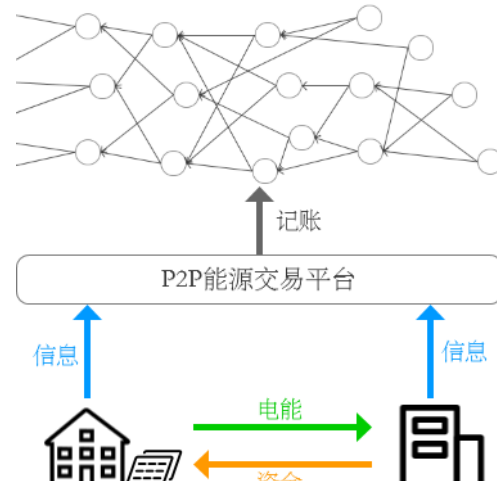


图 4 基于 IOTA 的 P2P 能源交易平台示意图
Fig. 4 Diagram of Peer-to-Peer Energy Trading Platform Based on IOTA

5 结论

边缘计算和共识是分布式计算中的两个热门课题。本文通过对将二者结合的文献的总结，分析了二者的互惠关系：边缘计算框架提高了共识算法的可行性和实用性，共识算法为边缘计算提供安全性和鲁棒性。

另外，本文正式提出“共识边缘计算”的概念，并对其在能源互联网领域的应用进行展望，同时也为本文今后的工作指明了两种方向：一方面可以从理论上设计效率更高可拓展性更强的共识边缘计算系统，另一方面可以在能源互联网的背景下探索更多“共识边缘计算”的应用场景。

6 参考文献

- [1] Satyanarayanan M. The Emergence of Edge Computing [J]. Computer, 2017, 50(1): 30-39.
- [2] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算:万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017(5).
- [3] 符永铨, 李东升. 边缘计算环境下应用驱动的网络延迟测量与优化技术[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 512-523.
- [4] Anand A, Muthusamy A. Data security and privacy-preserving in cloud computing paradigm:

- survey and open issues [C].// Cloud Computing Applications and Techniques for E-Commerce. IGI Global, 2020: 99-133.
- [5] Shi W, Dustdar S. The promise of edge computing [J]. Computer, 2016, 49(5): 78-81.
- [6] Newport C. Consensus with an abstract MAC layer [C].// Proceedings of the 2014 ACM symposium on Principles of distributed computing. 2014: 66-75.
- [7] Schenato L, Gamba G. A distributed consensus protocol for clock synchronization in wireless sensor network [C].// 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2007: 2289-2294.
- [8] Maggs M K, O'keefe S G, Thiel D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks [J]. IEEE sensors Journal, 2012, 12(6): 2269-2277.
- [9] Kocarev L (editor). Consensus and synchronization in complex networks [M]. Springer, 2013.
- [10] Grover H. A distributed algorithm for resource deadlock detection using time stamping [J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2013, 2(11): 4124-4132.
- [11] Fernández-Campusano C, Cortiñas R, Larrea M. A performance study of consensus algorithms in omission and crash-recovery scenarios [C].// 2014 22nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. IEEE, 2014: 240-243.
- [12] Alagappan R, Ganesan A, Lee E, et al. Protocol-Aware Recovery for Consensus-Based Distributed Storage [J]. ACM Transactions on Storage (TOS), 2018, 14(3): 1-30.
- [13] Iancu V, Ignat I. A peer-to-peer consensus algorithm to enable storage reliability for a decentralized distributed database [C].// 2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR). IEEE, 2010, 2: 1-6.
- [14] Abadi D. Consistency tradeoffs in modern distributed database system design: CAP is only part of the story [J]. Computer, 2012, 45(2): 37-42.
- [15] Bailis P, Fournier C, Arulraj J, et al. Research for practice: Distributed consensus and implications of NVM on database management systems [J]. Communications of the ACM, 2016, 59(11): 52-55.
- [16] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [R]. Manubot, 2019.
- [17] Castro M, Liskov B. Practical Byzantine fault tolerance and proactive recovery [J]. ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), 2002, 20(4): 398-461.
- [18] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015(05): 117-134.
- [19] 李庆生, 唐学用, 赵庆明, 等. 弱中心化的区块链技术在能源互联网交易体系中的应用分析[J]. 电力大数据, 2019(6): 22-27.
- [20] 张弘. 基于区块链的物联网管理系统设计与实现[D]. 2019.
- [21] 崔树银, 陆奕, 常啸. 考虑信用评分机制的电力碳排放交易区块链模型[J]. 电力建设, 2019, 040(001): 104-111.
- [22] Bagloee S A, Tavana M, Withers G, et al. Tradable mobility permit with Bitcoin and Ethereum---a blockchain application in transportation [J]. Internet of Things, 2019, 8: 100103.
- [23] Munir M S, Abedin S F, Tran N H, et al. When edge computing meets microgrid: a deep reinforcement learning approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7360-7374.
- [24] 李栋. 边缘计算在智能制造中的解决方案[J]. 自动化博览, 2017, 000(001): 74-77.
- [25] Hashem I A T, Chang V, Anuar N B, et al. The role of big data in smart city [J]. International Journal of Information Management, 2016, 36(5): 748-758.
- [26] 周远新. 利用边缘计算和云计算 实现智慧城市的管理和应用[J]. 数码世界, 2019(3).
- [27] Sun Y, Guo X, Song J, et al. Adaptive learning-based task offloading for vehicular edge computing systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3061-3074.
- [28] Manzalini A, Minerva R, Callegati F, et al. Clouds of virtual machines in edge networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7): 63-70.
- [29] 谢人超, 廉晓飞, 贾庆民, 等. 移动边缘计算卸载技术综述[J]. 通信学报, 2018, 039(011): 138-155.
- [30] Tran T X, Pompili D. Joint task offloading and resource allocation for multi-server mobile-edge

- computing networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 68(1): 856-868.
- [31] 刘勇, 李飞, 高路路, 等. 基于区块链技术的车联网汽车身份认证可行性研究[J]. *汽车技术*, 2018, No.513(06):20-25.
- [32] Kherraf N, Alameddine H A, Sharafeddine S, et al. Optimized provisioning of edge computing resources with heterogeneous workload in IoT networks [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2019, 16(2): 459-474.
- [33] Wang T. Fairness for Distributed Algorithms [D]. Georgetown University, 2017.
- [34] Lamport L. The part-time parliament [C]// *Concurrency: the Works of Leslie Lamport*. 2019: 277-317.
- [35] Ongaro D, Ousterhout J. In search of an understandable consensus algorithm [C]// *2014 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 14)*. 2014: 305-319.
- [36] 焦传熙, 高志伟. 拜占庭容错机制在 P2P 网络安全中的应用[J]. *石家庄铁道学院学报*(1): 66-71.
- [37] Fischer M J, Lynch N A, Paterson M S. Impossibility of distributed consensus with one faulty process [J]. *Journal of the ACM (JACM)*, 1985, 32(2): 374-382.
- [38] Kotla R, Alvisi L, Dahlin M, et al. Zyzzyva: Speculative byzantine fault tolerance [J]. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 2010, 27(4): 1-39.
- [39] Kiayias A, Russell A. Ouroboros-BFT: A Simple Byzantine Fault Tolerant Consensus Protocol [J]. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2018, 2018: 1049.
- [40] Miller A, Xia Y, Croman K, et al. The honey badger of BFT protocols [C]// *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. 2016: 31-42.
- [41] Baird L. Hashgraph consensus: fair, fast, byzantine fault tolerance [J]. *Swirls Tech Report*, Tech. Rep., 2016.
- [42] Gunn L J, Liu J, Vavala B, et al. Making Speculative BFT Resilient with Trusted Monotonic Counters [J]. *arXiv preprint arXiv:1905.10255*, 2019.
- [43] Aguilera M K, Ben-David N, Guerraoui R, et al. The impact of RDMA on agreement [C]// *Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. 2019: 409-418.
- [44] Bonniot L, Neumann C, Taïani F. PnyxDB: a lightweight leaderless democratic byzantine fault tolerant replicated datastore [J]. *arXiv preprint arXiv:1911.03291*, 2019.
- [45] Gilad Y, Hemo R, Micali S, et al. Algorand: scaling byzantine agreements for cryptocurrencies [C]// *Proceedings of the 26th Symposium on Operating Systems Principles*. 2017: 51-68.
- [46] Tong W, Dong X, Zheng J. Trust-PBFT: a peertrust-based practical byzantine consensus algorithm [C]// *2019 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. IEEE, 2019: 344-349.
- [47] Nguyen D C, Pathirana P N, Ding M, et al. Blockchain as a Service for multi-access edge computing: a deep reinforcement learning approach [J]. *arXiv preprint arXiv:2001.08165*, 2019.
- [48] Kang J, Yu R, Huang X, et al. Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 6(3): 4660-4670.
- [49] 朱晓云. 边缘数据中心:边缘计算风口下数据中心的未来[J]. *信息通信技术与政策*, 2019, 000(002): 14-17.
- [50] Jannes K, Lagaisse B, Joosen W. You don't need a ledger: lightweight decentralized consensus between mobile web clients [C]// *Proceedings of the 3rd Workshop on Scalable and Resilient Infrastructures for Distributed Ledgers*. 2019: 3-8.
- [51] Strauß J. Control-plane consistency in software-defined networking: distributed controller synchronization using the ISIS² toolkit [D]. University of Stuttgart, 2015.
- [52] Hao Z, Yi S, Li Q. EdgeCons: achieving efficient consensus in edge computing networks [C]// *USENIX Workshop on Hot Topics in Edge Computing (HotEdge 18)*. 2018.
- [53] Chand S, Liu Y A, Stoller S D. Formal verification of multi-Paxos for distributed consensus [C]// *International Symposium on Formal Methods*. Springer, Cham, 2016: 119-136.
- [54] Hao Z, Yi S, Li Q. Nomad: An Efficient

- Consensus Approach for Latency-Sensitive Edge-Cloud Applications [C].// IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2019: 2539-2547.
- [55] Wang S C, Hsiung W S, Yan K Q, et al. The first protocol of reaching consensus under unreliable mobile edge computing paradigm [J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2019, 15(2): 713-723.
- [56] Feng L, Zhang H, Chen Y, et al. Scalable dynamic multi-agent practical byzantine fault-tolerant consensus in permissioned blockchain [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1919.
- [57] Salimitari M, Chatterjee M. A survey on consensus protocols in blockchain for IoT networks [J]. *arXiv preprint arXiv:1809.05613*, 2018.
- [58] Popov S. The Tangle [J]. *cit. on*, 2016: 131.
- [59] Nguyen Q, Cronje A. ONLAY: online layering for scalable asynchronous BFT system [J]. 2019.
- [60] Azouvi S, McCorry P, Meiklejohn S. Betting on blockchain consensus with Fantôme [J]. *arXiv preprint arXiv:1805.06786*, 2018.
- [61] Churyumov A. Byteball: A decentralized system for storage and transfer of value [J]. URL <https://byteball.org/Byteball.pdf>, 2016.
- [62] Divya M, Biradar N B. IOTA-next generation block chain [J]. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 2018, 7(04): 23823-23826.
- [63] Sompolinsky Y, Zohar A. PHANTOM: a scalable BlockDAG protocol [J]. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2018, 2018: 104.
- [64] Zhang Z, Vasavada V, Ma X, et al. DLedger: An IoT-Friendly Private Distributed Ledger System Based on DAG [J]. *arXiv preprint arXiv:1902.09031*, 2019.
- [65] Rahman M A, Rashid M M, Hossain M S, et al. Blockchain and IoT-based cognitive edge framework for sharing economy services in a smart city [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 18611-18621.
- [66] Hosseinian H, Shahinzadeh H, Gharehpetian G B, et al. Blockchain outlook for deployment of IoT in distribution networks and smart homes [J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020, 10(3): 2787.
- [67] Andoni M, Robu V, Flynn D, et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 100: 143-174.
- [68] Serpell O. Energy and the Blockchain-Opportunities and Challenges for Climate and Energy Governance [OL]. Kleiman Center for Energy Policy-University of Pennsylvania School of Design [accessed 20 July 2018]. Available at: <https://kleimanenergy.upenn.edu/sites/default/files/policydigest/Energy%20and%20the%20Blockchain.pdf>, 2018.
- [69] 任昊文, 杨雅琪. 区块链分布式技术在电力需求侧响应管理中的应用[C].// 2018 电力行业信息化年会. 421.
- [70] Puthal D, Mohanty S P, Yanambaka V P, et al. Poah: A novel consensus algorithm for fast scalable private blockchain for large-scale IoT frameworks [J]. *arXiv preprint arXiv:2001.07297*, 2020.
- [71] 戚艳, 刘敦楠, 徐尔丰, 等. 面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题及展望[J]. *电力建设*, 2019, 040(001): 123-132.
- [72] Casado-Vara R, Prieto J, Corchado J M. How blockchain could improve fraud detection in power distribution grid [C].// The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications. Springer, Cham, 2018: 67-76.
- [73] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 037(013): 3729-3736.
- [74] 郭鹤旋, 鲁斌. 基于交叉区块链的能源互联网信息物理安全防御框架[J]. *电脑知识与技术*, 2018, 014(023):7-9.
- [75] Hwang J, Choi M, Lee T, et al. Energy prosumer business model using blockchain system to ensure transparency and safety [J]. *Energy Procedia*, 2017, 141: 194-198.
- [76] 张泽海. 基于区块链技术和支持向量机学习的微网警报处理方法研究[J]. *决策探索: 中*, 2019, 606(02): 70-71.
- [77] Jannes K, Lagaisse B, Joosen W. You don't need a ledger: lightweight decentralized consensus between mobile web clients [C].// *Proceedings of the 3rd Workshop on Scalable and Resilient Infrastructures*

for Distributed Ledgers. 2019: 3-8.

[78] Rahmania R, Lib Y. A Scalable Digital Infrastructure for Sustainable Energy Grid Enabled by Distributed Ledger Technology [J]. Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Networks, 2020, 12(2): 17-24.

[79] Lupascu C, Lupascu A, Bica I. DLT based authentication framework for industrial IoT devices [J]. Sensors, 2020, 20(9): 2621.

[80] Park J, Chitchyan R, Angelopoulou A, et al. A block-free distributed ledger for p2p energy trading: case with IOTA? [C]// International Conference on Advanced Information Systems Engineering. Springer, Cham, 2019: 111-125.

[81] IOTA Foundation. Smart energy [OL]. Available

at <https://www.iota.org/verticals/smart-energy> [accessed 20 May 2020], 2018.

van den Brink H. World's first IOTA Smart Charging Station [OL]. Available at <https://blog.iota.org/worlds-first-iota-smart-charging-station-52f9024db788> [accessed 20 May 2020], 2018.

收稿日期: 2020-05-25

作者简介:

王同贺(1990), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为分布式计算、能源区块链, E-mail: tonghewang@tsinghua.edu.cn;

华昊辰(1988), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为能源互联网系统建模、优化和控制, E-mail: huahc16@tsinghua.org.cn;

曹军威(1973), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为分布式计算与网络、智能电网、能源互联网, E-mail: jcao@tsinghua.edu.cn。

(编辑 ***)