北京信达 综合防护 工控安全 8000用户
www.s-numen.com

中图分类号: TP311　文献标志码: A　文章编号: 2095-641X(2020)06-023-07　DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2020.06.004
著录格式: 蔡维德 , 马圣程 , 杨冬 , 等 . 能源区块链应用的基础设施互链网技术研究 [J]. 电力信息与通信技术 , 2020, 18(6): 23-29.

能源区块链应用的基础设施互链网技术研究

蔡维德[1,2],马圣程[1],杨冬[1],王荣[1],邓恩艳[2]
(1. 软件开发环境国家重点实验室(北京航空航天大学)数字社会与区块链实验室,北京 100191;
2. 北京天德科技有限公司,北京 100089)

Research on Internet of Blockchain Infrastructure of Energy Blockchain Application

TSAI Weitek[1,2], *MA Shengcheng*[1], *YANG Dong*[1], *WANG Rong*[1], *DENG Enyan*[2]
(1. Digital Society & Blockchain Laboratory, State Key Laboratory of Software Development Environment (Beihang University), Beijing 100191, China; 2. Tiande Technologies, Beijing 100089, China)

摘要: 区块链具有分布式记账、多节点数据共享、防篡改、可追溯和审计等技术优势,被越来越多的应用在能源领域。基于区块链的能源互联网能够实现各方的身份认证和互信,优化能源流程,降低成本,在促进能源系统各环节的互通互联、促进不同能源结构的耦合优化等方面发挥着重要的作用。文章首先介绍了许可区块链技术、互链网技术和智能合约技术的发展现状,以及区块链在能源领域的典型应用,然后将互链网作为能源行业的基础设施来设计,并详细描述了互链网的区块链操作系统设计特性,提出了基于层次关系的功能架构和突出监管的设计原则,最后对系统的创新性进行了讨论和总结。
关键词: 许可区块链; 能源互联网; 互链网; 智能合约

Abstract: Blockchain has the technical advantages of distributed accounting, multi-node data sharing, tamper resistance, traceability audit, and etc., and is increasingly used in the field of energy. Energy Interconnection based on blockchain can realize all parties identification and mutual trust, optimizing energy processes, reducing costs, it plays an important role in promoting the interconnection of various links in the energy system, and promoting the coupling and optimization of different energy structures. In this paper, we first introduce the development of permissioned blockchains technology, Internet of blockchain and smart contract technology. Then we elaborate the typical application of several kinds of blockchain in the energy field and the implementation principle of typical technical solutions. We designs the Internet of blockchain as the infrastructure of power energy and describes the characteristics of the blockchain operating system. We propose a framework based on hierarchical relationship and a principle of enhanced supervision. Finally, the innovation of the system is discussed and summarized.
Key words: permissioned blockchain; energy interconnection; Internet of blockchain; smart contract

0　引言

区块链(Blockchain)是多个独立节点参与的分布式数据库系统,也被称为分布式账簿(Distributed Ledger Technology, DLT)。区块链的特点有防篡改、防伪造、可追溯,区块链记录所有的交易信息,过程高效透明,数据高度安全。在需要公正、公平、诚信的应用领域,都可以通过区块链技术来实现预定目标[1]。

当前,中国能源市场结构和市场体系深层次问题仍很突出,科技创新在能源发展中的作用还不显

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB329601);
国家自然科学基金(61672075,61690202);科技部重大项目(2018YFB1402700)。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

著，长期形成的粗放发展方式亟待转变。人工智能、区块链、大数据等新一代信息技术在各领域加速渗透应用，成为驱动行业技术创新和产业变革的重要力量。作为一种能够建立信任的分布式技术，区块链具有极高的战略价值和极广的应用前景。作为一类新兴的分布式数据存储技术[2]，区块链在金融、政务、能源、医疗、知识产权、司法、网络安全等领域的应用逐步展开，正成为驱动各行业技术创新和产业变革的重要力量。基于区块链的能源互联网能够实现各方的身份认证和互信，优化能源流程。通过结合开放共享、安全可信的区块链和智能合约技术，可以重塑能源从生产到消费的格局，降低能源成本，提高能源的利用率，促进智能能源互联网的发展[3]。

中国工程院院士陈清泉提出了“四网四流”的能源供给侧改革的创新思想，即实现能源网、交通网、信息网、人文网的四网融合以及能源流、信息流、物质流、价值流的四流融合；提出下一代的物链网是融合区块链和物联网，利用物链网技术进行智能建筑的信息采集（温度、湿度、空调系统、光照系统、发电量、耗电量以及人员流动等），并保证数据的安全性、可信性和可审计性。

2019 年 12 月，国网区块链科技（北京）有限公司基于自主研发的区块链底层技术服务平台，全面强化区块链在能源电力领域的应用落地，在新能源云[4]、电力交易[5]、优质服务、综合能源、物流采购[6]、智慧财务、智慧法律[7]、数据共享、安全生产、金融科技[8]等十大场景形成了具备典型性、高可行性的区块链技术解决方案。

用电信息采集一直是智能电网研究的热点，如何采集用户的用电信息，并为智慧电力提供发展动力引起了很多学者的关注。张雪彬等人从电力用户用电信息采集系统的应用现状出发，针对用电信息采集系统的应用推广进行探讨，为实现配网自动化及智能化提供借鉴[9]。2019 年，北京航空航天大学研发了基于区块链的电力需求侧系统，该系统解决了电力需求侧的系统时效性差、响应信息共享度不高、用户隐私保护不力以及过程不可追溯等问题。在该系统中，电力需求响应功能通过在区块链上部署链上代码实现，使得需求响应过程变得开放、透明、安全且灵活。系统有电力积分激励机制，根据需求响应执行情况进行评估，链上代码自动执行奖励或惩罚。同时电力积分能够在该系统上与电量、购物券、电影票、景点门票、碳排放指标等进行交易，使得需求侧的管理变得更加灵活。电力需求侧管理从政府主导机制转变为市场主导机制，极大地提升了用户响应的积极性，同时也创造了新的商业模式，有利于推动电力行业的发展。

LO3 Energy 是纽约布鲁克林的一家区块链创业公司，2016 年 4 月 LO3 团队建立了 Brooklyn 微电网试点项目和全球首个能源区块链交易系统[10]。Brooklyn 微电网连接了约 60 个光伏发电点，并通过区块链技术让光伏业主可以自由地在系统上进行电力交易。

“售电 + 综合服务”作为综合能源服务的重要实现模式，具有参与主体多、实施业务类型广、交易信息量大等特点，在实施过程中存在可靠性、安全性以及交易不可追溯性等问题。利用区块链技术能够将“售电 + 综合服务”过程中的全部交易信息进行存储，降低了交易难以查询、信息泄露以及交易漏洞等风险。

区块链在油、气行业的最直接应用是打破了生产商和大宗商品交易商长久以来的“纸质”交易模式，加速转向更透明、更便捷、更便宜的“电子”模式。诞生于 2017 年的全球首个区块链石油交易平台 Vakt，通过利用区块链技术优势，简化了传统对账业务流程，消除了纸质文件，进而提高了整个贸易生命周期效率，并创造更多全新的贸易融资机会。

区块链技术与电力能源应用的结合需要将区块链作为一种基础设施来设计，建立一个一体化的能源系统。区块链基础设施需要设计全新的数据库、网络、加解密和存储，因此，需要在区块链技术上进行新的突破，提升新的高度。为了满足新基建的需求，本文提出了新的区块链操作系统架构。区块链操作系统架构与传统操作系统在功能上有很大的不同，重点突出区块链的监管功能，在传统操作系统架构的基础之上，增加原生的对区块链功能的支持。

1 区块链新定义

传统区块链系统就是块子链、多节点、拜占庭将军协议[11]、智能合约[12]。还有定义会把 P2P 网络[13]协议放在区块链定义中，但这是不对的，因为如果将 P2P 协议放进区块链定义中，所有区块链都是逃避监管的。本文提出新的区块链定义：区块链 + 智能合约 + 预言机。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1）区块链控制数据，使数据不能篡改，保证数据的一致性。

2）智能合约控制应用流程，使流程更加标准化及微服务化。标准化、微服务化的智能合约是一种监管型的智能合约。这样，数据控制在区块链上，流程控制在智能合约上，数据来自区块链而又回到区块链。

3）预言机是区块链的智能合约用来收集外界信息的接口。智能合约的执行需要与外部信息进行交互，例如需要股票或者币价的实时价格等信息，这些外部信息就需要预言机为智能合约提供。

2 互链网技术

新型互链网在支撑区块链应用的基础设施方面与传统技术有很多不同，这些不同体现在网络、数据库和存储等方面。

互链网技术如图 1 所示，左边是传统的互联网，最上面的应用层是安全的，但是下面的网络通信是不安全的，是一个开放性的架构。右边是一个新的区块链互联网架构，也就是互链网架构[14]。在网络协议层之上加入共识协议层，共识层上面是区块链核心层，最上层是业务应用层。

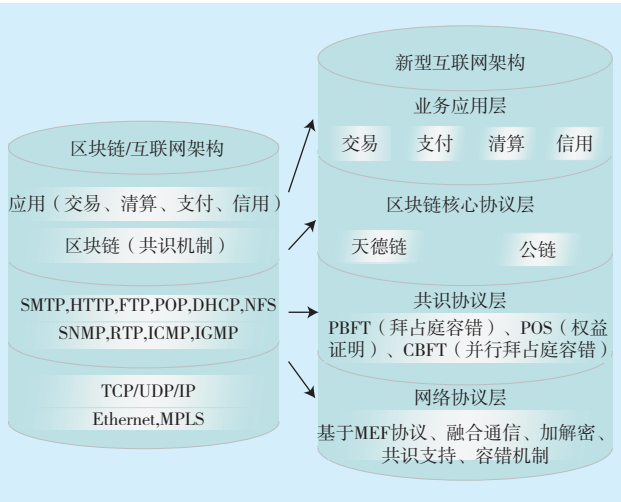


图 1 互链网技术

Fig.1 Internet of blockchain technology

1）网络协议：传统互联网虽然速度快，但是不安全，而且时常有信息被窃取的情况发生。新架构的网络思想不但追求速度，更注重安全和隐私。保护隐私和监管是互链网的首要目的，因此互链网提出新的网络协议 MEF（Multiple Explicit Feedback），并且兼容现在的协议。在互链网上，每个团队或每个组织都可以进行开发，具有更好的应用生态环境。

2）操作系统：传统操作系统的架构多年来一直没有变化。当前的应用需要支持监管交易，操作系统需要改变。因此，提出了操作数据库系统（Operating DataBase Systems，ODBS）概念。新型操作系统需要在进程、存储和安全机制等方面有所创新。当 ODBS 广泛应用时，就可以实现交易的监管。

3）数据库：2019 年，微软研究院和德国达姆施塔特工业大学提出了 BlockchainDB[15]，北航数字社会与区块链团队也提出了区块链查询语言（Blockchain Query Language，BQL）和数据湖（Blokchain Data Lake，BDL）。BQL 使区块链查询更方便，而 BDL 是监管区块链数据的平台，区块链交易可以在数据湖内进行查询和大数据分析。

3 区块链操作系统

区块链操作系统有以下特性：

1）安全第一：隐私数据完全加密，数据不能篡改，身份认证，私钥保护；

2）监管：交易必须经过系统账本，否则禁止交易，维护账本防止任何应用改变账本，包括操作系统，实时提供监管信息给监管单位，排斥数字代币代码，拒绝此类应用在操作系统中运行。

传统操作系统设计优先保证功能和性能，其安全性得不到有效保证，因此必须发展许多协议来维持系统的安全性。但是在互链网上，因为有区块链操作系统，许多安全机制都在操作系统上完成。

操作系统从早期 Multics，到后来的 UNIX 和 Linux，一直到最近的云操作系统[16]，都没有和区块链结合，且没有和监管结合。本文提出犀牛操作系统模型，该模型有层分层、管中管、块中块、片分片、密中密等设计原则，这些设计都是在传统操作系统上的创新。

4 层分层的区块链设计架构

层分层是突出区块链操作系统功能的层次架构关系，管中管是为了说明新型区块链基础设施突出监管的重要特点。对于区块链功能的增加主要有以下几个部分：共识功能、监管功能、高速网络以及数据加解密，重点突出监管功能在整个系统架构中的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高安全和高优先级特性，同时将加解密、一致性验证和交易存证等功能下沉到操作系统内核，提高区块链功能的效率。

新型区块链操作系统架构如图 2 所示。在新型区块链操作系统的内核层设计中，不但包含原有操作系统的内存管理、进程调度、文件系统等功能，还将数据加解密、高速网络，例如 MEF、BBR（Bottleneck Bandwidth and RTT）[17] 等、权限控制以及存证等区块链操作直接需要的支撑功能放入系统的内核层。



图 2 新型区块链操作系统架构

Fig.2 Architecture of new blockchain OS

新型的区块链操作系统在内核层和应用层之间，创新性地增加了共识层的设计。共识层主要用来保证区块链中多方数据的一致性，是区块链的核心操作。这一设计突破了原有操作系统的设计理念，将区块链操作中核心的共识机制原生地部署在内核层的上面。如图 3 所示，之所以共识层要设计在内核上层，是由于共识机制需要加解密数据，并且与多个节点之间进行网络通信，这都需要内核层中的加解密、高速网络、权限控制以及存证等功能为这一层提供功能上的支撑。

具体的模块间依赖关系如下（符号 ⇒ 表示推出、支持，例如 A 支持 B，B 依赖于 A，则表示为 A⇒B，如果 A 和 B 共同支持 C，那么 B 在下一行表示）：

硬件加速卡 ⇒ 高速网络协议 ⇒ 高速网络

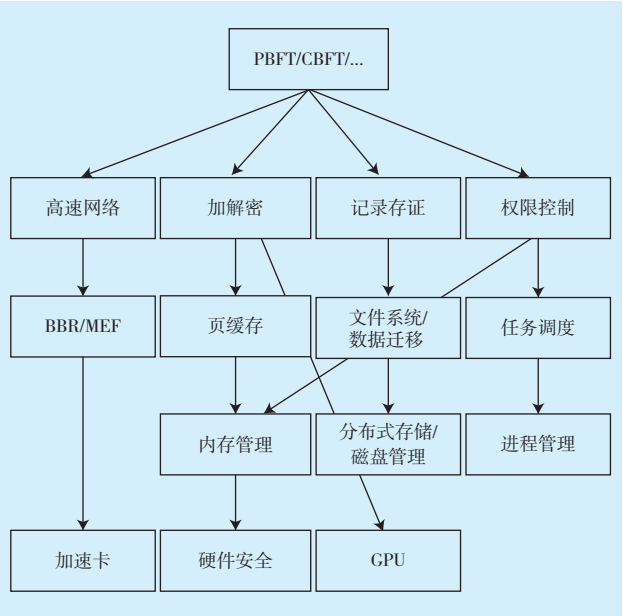


图 3 共识层对内核层功能的依赖关系

Fig.3 The relationship between consensus layer and kernel layer

安全芯片 ⇒ 内存管理 ⇒ 段页式缓存 ⇒ 加解密

GPU⇒ 加解密

磁盘管理 / 分布式存储 ⇒ 文件系统 / 数据迁移 ⇒ 存证

进程管理 ⇒ 调度机制 ⇒ 权限控制

安全芯片 ⇒ 内存管理 ⇒ 权限控制

高速网络 ⇒ 共识层

加解密 ⇒ 共识层

存证 ⇒ 共识层

权限控制 ⇒ 共识层

根据功能依赖关系可知，将共识层部署在内核层之上才能保证全局的安全性，同时也可以提高内核模块调用的效率。在共识层的上方是应用层，应用层支持区块链操作中的交易、支付、清算和信用等功能。应用层依赖共识层实现对身份账户信息和交易信息的监管功能。

新型的区块链操作系统需要对所有的数据和任务进行分级管理。在 Scheduler 调度模块中，对系统中的数据和任务采取优先级和实时性结合的分级处理原则。监管数据又分为实时性高的数据（如交易数据）和非实时性数据（如账户数据），处理数据的程序分为监管程序和普通程序。

分级管理实现的思路是采用 4 级队列：第 1 级是实时性高的监管数据队列，第 2 级是实时性高的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

非监管数据队列，第 3 级是非实时性的监管数据队列，第 4 级是非实时性非监管数据队列。监管程序按优先级检查队列，查看是否有待处理任务，如果有就去处理。待高优先级队列的任务都处理完成后，将队列的权限交给普通程序，普通程序只能对低非监管数据队列的任务进行处理（见图 4）。

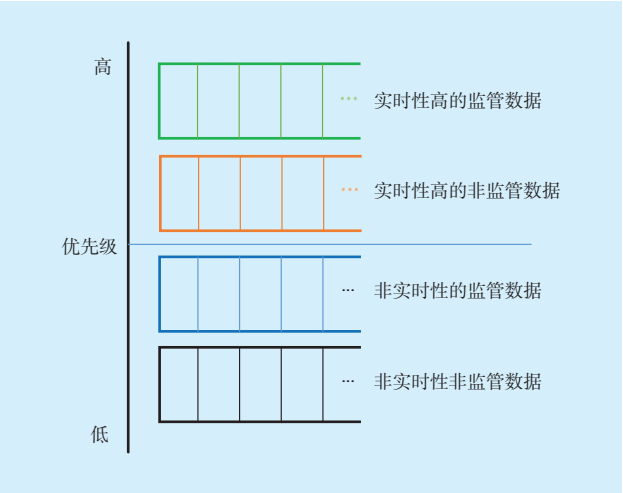


图 4 新型区块链系统中数据队列调度示意

Fig.4 Scheduler in new blockchain OS

新型的任务调度支持与已有的操作系统调度算法结合，例如先来先服务[18]（First Come First Service，FCFS），短进程优先（Shortest Process Next，SPN），最短剩余时间优先（Shortest Remaining Time，SRT），完全公平调度[19]（Completely Fair Scheduler，CFS）等算法，结合传统的操作系统调度算法可以提高系统的兼容性。例如，新型任务调度可以和 CFS 调度算法结合，在处理监管数据时，按照新型的任务调度对数据进行排队，在每个任务队列内部，利用传统的 CFS 调度策略进行处理。通过增加对监管队列的特殊处理，使系统同时满足信息监管和实时处理这 2 种需求。

5 管中管的区块链设计架构

在能源领域，同样存在监管的需求。例如针对电力设备台账进行审计监管的需求[20]。应用互链网技术，可以协助能源部门更好地进行监管。

为实现监管，要分析以往技术的不足。传统的操作系统对于内存的管理只分为内核空间和用户空间，只设计了 2 个区域，没有针对交易信息和账户等区块链数据做专门处理，所有数据都存储在用户空间，查找效率低，且不利于监管，存在隐私泄露、数据篡改等问题。

为了解决这些问题，互链网系统提出了结合硬件安全芯片实现物理隔离的监管区存储机制，定义了新的针对账号、交易等监管数据的文件属性。

从监管的视角出发，可以将数据划分为以下 3 类：① Plaintext，未加密的数据；② Ciphetext，加密的数据；③ Regulatory data，监管数据，包含加密和非加密数据。监管数据是与区块链交易相关的账户信息和交易信息。

数据按照监管的敏感程度分区进行管理。如表 1 所示，系统的最初始文件是操作系统的文件，处于内核引导区。与传统存储不同的是，普通存储区又分为监管区、密文区和明文区。监管区存储所有需要监管的文件，包括账户信息、当前交易信息、历史交易信息及账户相关人的信息等。

表 1 存储分区

Table 1 Storage partitions

级别	位置	类型
1	明文区	开放数据
2	密文区	加密数据
3	监管区	监管类型
4	内核区	操作系统文件

文件增加了监管属性，并定义了监管属性与原有文件属性之间的关系。如果一个文件的内容与账户信息和交易信息相关，就要在这个文件的属性上增加一个 T（Trade）标签，表示这个文件是一个需要监管的文件。现在操作系统标签有 R（Read）、W（Write）、X（eXecute），文件属性加上 T 后，还可以有 TR（Read）、TA（Append）、TX（eXecute）。

TR 和 TA 在系统中代表资产信息，在公检法系统代表证据信息，每一次读和写都必须记录在案。TX 代表智能合约或链上代码，可以执行，执行时也会接触到被监管的账户或交易信息。因为 TX 存的是代码，读和追加必须特别处理（只能上传一次）。各权限的相互关系如表 2 所示。

表 2 中，TR（监管读）和 R、W、X 不能同时存在，也不能和 TX 同时存在，如遇到需要特殊处理；TA（监管追加）和 R、W、X 不能同时存在，也不能和 TX 同时存在，如遇到需要特殊处理；TX（监管执行）和 R、W、X 不能同时存在，遇到 TR 和 TA 时需要特

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 文件权限相互关系表

Table 2 File rights interrelation table

关系	R	W	X	TR	TA	TX
R	–	OK	OK	No	No	No
W	OK	–	OK	No	No	No
X	OK	OK	–	No	No	No
TR	No	No	No	–	OK	S
TA	No	No	No	OK	–	S
TX	No	No	No	S	S	–

注：OK 表示兼容，可以同时存在 2 种属性；No 表示不兼容，不能同时存在这 2 种属性；S 表示特殊处理。

殊处理。

监管区的数据永不更改，数据只能追加，不能修改，最终将数据写到和操作系统相关的区块链中。在明文区、加密区和部分操作系统中的文件可以更改。监管区的软件可以修改明文区和加密区的数据，明文区软件和加密区软件，不能修改监管区以及操作系统区的软件。

在监管区内，如果发现文件前面的属性是错误的，直接拒绝处理。如果文件的标签是要监管的，就将数据迁移到监管区域。如果文件不需要监管，却存储在监管区域，那么要将文件迁移出监管区域。操作系统区的程序的权限相对较高，可能会由于某些异常情况进入监管区，一旦发生操作系统软件对 T 属性的文件进行修改时，立刻停止。

传统的监管主要是基于等级保护、权限管理等机制进行，在现有区块链的应用场景下有些不太适合。因为传统的应用场景是基于用户的，用户的等级权限在创建用户之初就定义完成，而区块链的用户是随时可能增加上链并进行交易，所以本文设计的监管机制基于数据和操作，分为监管内容和非监管内容。这样设计的好处是敏感的数据或用户行为都被监管，而不重要的非监管数据直接过滤掉，不需要耗费计算资源。

新的监管机制所设计的操作系统创新性地提出了监管属性。原有操作系统以及目前研发的云操作系统对文件属性的定义都是 RWX（可读可写可执行），而新的操作系统突出监管，定义了 T 交易属性。具有交易属性的文件其信息内容具有敏感性，监管程序需要对这类文件特殊处理。以往的操作系统都没有针对监管问题做出特殊的设计，可能存在逃避监管。新的具有 T 属性定义的操作系统改变了存储以及内存管理方式，使得数字代币等应用可以得到充分的监管。

6 结语

随着区块链技术的发展，能源网络基于开放透明和安全可信的发展需要，越来越需要与区块链技术结合。本文介绍了互链网技术发展现状以及区块链在能源领域的典型应用，根据区块链在电力能源领域中的作用，将互链网设计为能源网络的基础设施。详细描述了区块链操作系统的设计特性，提出基于层次关系的功能架构和突出监管的设计原则。通过与传统设计的对比，可以得出应用新型互链网架构的能源网络能够保证交易的安全，并且实现对交易的有效监管。

参考文献：

[1] 蔡维德，郁莲，王荣，等. 基于区块链的应用系统开发方法研究[J]. 软件学报，2017，28(6)：1474-1487.
TSAI Weitek，YU Lian，WANG Rong，et al. Blockchain application development techniques[J]. Journal of Software，2017，28(6)：1474-1487.

[2] 邵奇峰，金澈清，张召，等. 区块链技术：架构及进展[J]. 计算机学报，2018，41(5)：969-988.
SHAO Qifeng，JIN Cheqing，ZHANG Zhao，et al. Blockchain：architecture and research progress[J]. Chinese Journal of Computer，2018，41(5)：969-988.

[3] ZHENG X，JIA H，WANG J. Energy internet development based on blockchain technology[C]// ICCREM 2019：Innovative Construction Project Management and Construction Industrialization，Banff，Canada，2019：167-178.

[4] 邵炜晖，许维胜，徐志宇，等. 基于区块链的虚拟电厂模型研究[J]. 计算机科学，2018，45(2)：25-31.
SHAO Weihui，XU Weisheng，XU Zhiyu，et al. Study on virtual power plant model based on blockchain[J]. Computer Science，2018，45(2)：25-31.

[5] 鲁静，宋斌，向万红，等. 基于区块链的电力市场交易结算智能合约[J]. 计算机系统应用，2017，26(12)：45-52.
LU Jing，SONG Bin，XIANG Wanhong，et al. Smart contract for electricity transaction and charge settlement based on blockchain[J]. Computer Systems & Applications，2017，26(12)：45-52.

[6] 艾学瑛. 基于区块链和5G物联网的溯源及异常数据预警系统[J]. 电子设计工程，2020，28(10)：108-112.

理论研究与应用实践

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

AI Xueying. Design of traceability and anomaly data early warning system based on blockchain and 5G Internet of Things[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(10): 108-112.

[7] 李世寅. 未来已来: 区块链技术在智慧法院建设中的运用前景探析[J]. 信息安全与通信保密, 2019(10): 41-52.
LI Shiyin. The future is coming: an exploration of the application prospect of block chain technology in the construction of intelligent court[J]. Information Security and Communications Privacy, 2019(10): 41-52.

[8] 吴燕妮. 金融科技前沿应用的法律挑战与监管——区块链和监管科技的视角[J]. 大连理工大学学报: 社会科学版, 2018, 39(3): 78-86.
WU Yanni. Legal challenges and regulations for the application of frontiers of financial technology: a perspective of block chain and regulatory technology[J]. Journal of Dalian University of Technology(Social Sciences), 2018, 39(3): 78-86.

[9] 张雪彬, 刘伟. 用电信息采集系统的配电网应用研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(5): 56-58.
ZHANG Xuebin, LIU Wei. Study on electricity consumer information collection system in distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(5): 56-58.

[10] 程少. LO3 Energy: 站在风口的能源区块链公司[J]. 国家电网, 2018(3): 46-49.

[11] 范捷, 易乐天, 舒继武. 拜占庭系统技术研究综述[J]. 软件学报, 2013, 24(6): 186-200.
FAN Jie, YI Letian, SHU Jiwu. Research on the technologies of byzantine system[J]. Journal of Software, 2013, 24(6): 186-200.

[12] KOSBA A E, MILLER A, SHI E, et al. Hawk: The blockchain model of cryptography and privacy-preserving smart contracts[C]// In 37th IEEE Symposium on Security & Privacy, 2016.

[13] 熊伟, 谢冬青, 焦炳旺, 等. 一种结构化P2P协议中的自适应负载均衡方法[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 660-670.
XIONG Wei, XIE Dongqing, JIAO Bingwang, et al. Self-adaptive load balancing method in structured P2P protocol[J]. Journal of Software, 2009, 20(3): 660-670.

[14] 蔡维德, 姜晓芳, 马圣程, 等. 互链网-重新定义区块链[EB/OL].(2020.04.28)[2020-05-10]. http://m.xinhua08.com/share.php?url=http://fintech.xinhua08.com/a/20200428/1933522.shtml&from=groupmessage&isappinstalled=0.

[15] EL-HINDI M, BINNIG C, ARASU A, et al. BlockchainDB: a shared database on blockchains[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2019, 12(11): 1597-1609.

[16] MUSSE H M, ALAMRO L A. Cloud computing: architecture and operating system[C]// 2016 Global Summit on Computer & Information Technology(GSCIT), 2016.

[17] CARDWELL N, CHENG Y C, STEPHEN G C, et al. BBR: congestion-based congestion control[J]. ACM Queue, 2016, 60(2): 58-66.

[18] 汪浩, 黄明和, 龙浩. 基于G/G/1-FCFS、M/G/1-PS和M/G/∞排队网络的Web服务组合性能分析[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 22-38.
WANG Hao, HUANG Minghe, LONG Hao. The performance analysis of web services composition based on queueing network with G/G/1-FCFS、M/G/1-PS and M/G/∞ nodes[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 22-38.

[19] ASYABI E, SHARAFZADEH E, SANAEEKOHROUDI S A, et al. CTS: an operating system CPU scheduler to mitigate tail latency for latency-sensitive multi-threaded applications[J]. Journal of Parallel & Distributed Computing, 2018(133):232-243.

[20] 郭晨鋆, 舒越, 马显龙, 等. 台帐数据高级核查处理技术研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(3): 43-48.
GUO Chenyun, SHU Yue, MA Xianlong, et al. Research and application of advanced verification processing technology for account data of equipment[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(3): 43-48.

编辑　张钦芝
收稿日期: 2020-05-15


蔡维德

作者简介:

蔡维德(1958–),男,北京航空航天大学数字社会和区块链实验室主任,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为区块链技术、智能合约、软件工程、服务计算分布式系统、云计算与大数据,tsai7@yahoo.com;

马圣程(1986–),男,博士研究生,通信作者,主要研究领域为区块链技术、网络性能评价、软件工程,mashengcheng@163.com;

杨冬(1991–),男,博士研究生,主要研究领域为区块链技术、软件工程;

王荣(1988–),男,博士研究生,主要研究领域为区块链技术、智能合约、机器学习;

邓恩艳(1972–),女,北京天德信息科技有限公司总裁,主要研究领域为区块链、软件工程。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net