

电力信息物理融合系统数据区块链生成算法

杨挺¹, 赵俊杰¹, 张卫欣², 赵英杰¹, 盆海波¹

(1. 天津大学 电气与自动化工程学院 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

摘要:随着电力信息物理融合系统(CPS)的发展,传统集中式数据采集架构运行存在透明度差、数据安全风险评估高等不足,利用区块链的去中心化、安全可信等特性,提出一种电力CPS数据区块链生成算法,以提升数据交互和使用过程的安全可信性。基于电力CPS数据的私有化特征,提出数据区块链架构,并采用区块生成节点内排队机制和节点间按需路由数据交换机制提升CPS数据区块链的建链速度,结合数据特征验证机制和私有化区块链的特性,确保数据能够实时传输、存储。采用5种不同IEEE标准算例对所提算法进行验证,结果表明所提算法具有更短的数据区块链建链时间和更好的传输性能。

关键词:电力信息物理融合系统;区块链;排队论;按需路由传输

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.012

0 引言

随着信息通信技术、计算机技术、控制技术在电力系统中的不断应用与发展,电网由传统电力物理网络逐渐演变成信息物理融合系统CPS(Cyber Physical System)^[1-2],并成为热点研究领域之一。目前,关于电力CPS的系统建模^[3]、协同控制^[4]、可靠性分析^[5]等方面的研究已得到较好的开展。然而,作为信息与物理深度融合的系统,其安全可靠运行离不开信息环节的支撑^[6]。因此,在电力CPS运行过程中,安全可靠地获取系统数据成为电力CPS精准控制、协同自治、可靠分析的关键。

作为一种去中心化、去信任的新兴技术,区块链是按照时间顺序将数据区块以链条方式组合成特定数据结构,并以密码学方式保证的不可篡改和不可伪造的去中心化共享数据获取交互机制^[7]。目前区块链已经在金融领域得到应用,并且部分研究开始涉及电力交易领域。但针对电力数据层面的应用还鲜有成果。本文就区块链框架下电力CPS的数据获取方式开展探索研究。

目前,电力CPS的数据获取管理大多采用集中式架构,如文献[8]设计配用电跨区数据采集方案,为配用电综合应用业务的开展提供统一数据支撑平

台;文献[9-10]利用广域测量系统WAMS(Wide Area Measurement System)主站互联获取底层设备采集的数据信息;文献[11]将采集数据上传到调度中心的风电场监控主站系统,从而实现风电数据采集。以上集中式管理架构高度依赖于主站数据库的安全性,如果发生故障或受到攻击,则将造成不可逆转的数据损失。而具有去中心化、去信任特点的区块链技术则为解决该问题提供了一种有效的方法。文献[12]将区块链技术引入数据获取过程中,提出一种传感数据真实性的保障方法,不仅能够成功采集传感数据,而且能提高数据的真实性。但该研究仅将区块链与数据获取相互结合,没有考虑实际应用过程中与具体应用场景相匹配的问题。本文在满足电力CPS业务需求的条件下,结合区块链技术的自身特性^[13],建立私有化数据区块链架构。

典型区块链技术形成一个新交易数据区块需要10 min左右的时间^[14],而电力CPS中存在多种实时性业务,时间尺度一般为秒级^[15]。因此,为了满足电网对数据的实时性需求,本文提出了改进的共识机制和节点间数据交换机制用以提升CPS数据区块链建链过程的传输速度。在改进共识机制层面,从CPS数据私有化特性出发,提出基于排队论和数据特征对比的电力CPS数据验证算法,缩短数据验证时间。在节点间数据交换层面,提出P2P网络按需路由算法,与文献[16]提出的配电网通信服务质量QoS(Quality of Service)路由和文献[17]基于平衡树的路由算法相比,其有更好的数据交换传输性能,提升了区块链技术在电力CPS数据获取过程中的适用性。

1 区块链技术原理

区块链技术是一种全新的去中心化数据架构与分布式计算范式,具有透明化、去中心化、高可信性、

收稿日期:2017-12-15;修回日期:2018-05-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903000);国家自然科学基金资助项目(61571324);天津市自然科学基金重点资助项目(16JCZDJC30900);国际科技合作专项项目(2013DFA11040)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0903000), the National Natural Science Foundation of China (61571324), the Key Program of Natural Science Foundation of Tianjin (16JCZDJC30900) and the National Program of International S&T Cooperation (2013DFA11040)

不可篡改、可追溯和高加密安全等特性^[14]。区块链组成架构如图 1 所示。其中,工作量证明等共识机制用于实现交易数据的不可篡改和不可伪造功能;数据安全机制用于实现对交易数据的内容进行哈希计算、非对称数据加密等;通信主体为 P2P 网络,其每个节点地位均对等且以扁平式拓扑结构相互连通和交互,不存在任何中心化的特殊节点和层级结构,每个节点均可承担网络路由、验证区块数据、传播区块数据、发现新节点等功能。

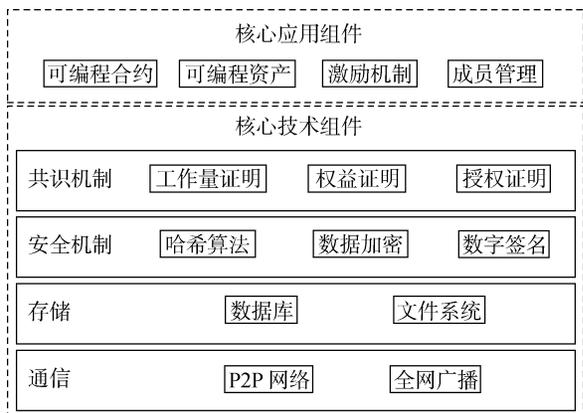


图 1 区块链组成架构

Fig.1 Component architecture of blockchain

在运行过程中,P2P 网络中各个节点通过执行授权证明机制竞争获取建立新区块的权利,将该周期内发生的交易数据存储到区块,并将该区块连接到区块主链上,从而形成区块链链式结构,如图 2 所示。每个数据区块是由区块头和区块体组成。区块头包含区块的大部分功能,包括当前区块的版本号、前一区块的地址、通过 Merkle 树哈希计算过程得到交易数据信息的 Merkle 根和记录该区块产生的时间戳等;区块体包含交易的数据信息。

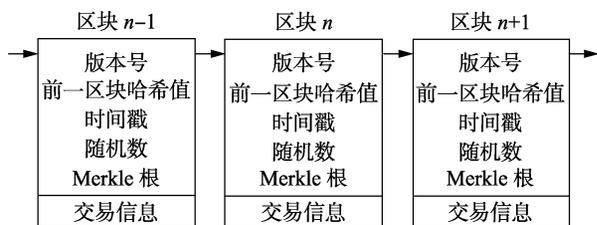


图 2 区块链链式结构

Fig.2 Chain structure of blockchain

2 电力 CPS 数据获取框架

2.1 私有化数据区块链

基于区块链技术和电力系统数据获取架构,本节建立私有化数据区块链,如图 3 所示。考虑到实际数据获取过程中,终端具有自治及双向通信功能,因此,将电力 CPS 终端作为生成数据区块的各个用户,而电力 CPS 中大量感知设备通过就近原则连接

到各个终端并向终端发送需求数据。同时各终端作为 P2P 网络中的对等节点进行互联互通,构成基于区块链结构的数据获取架构,具体数据区块生成过程如下。

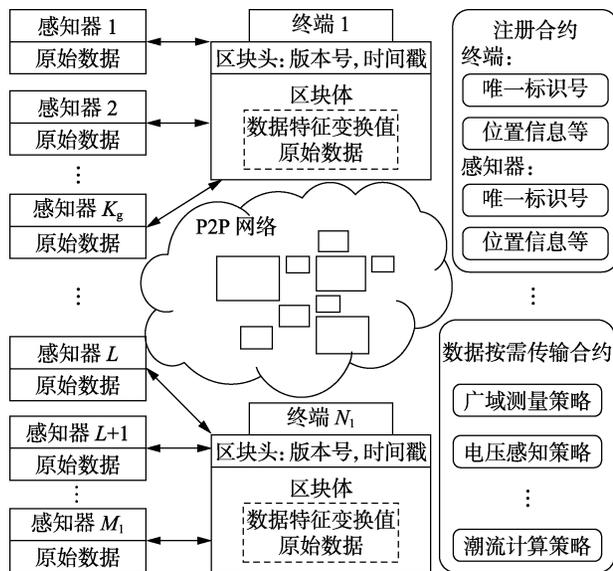


图 3 私有化数据区块链模型

Fig.3 Model of private data blockchain

(1) 生成数据区块。

私有化数据区块链从终端节点获取感知设备数据开始到生成区块链的过程如图 4 所示。由于典型的节点生成区块机制对节点的计算能力要求高,且共识机制时间较长^[18],本文依据私有链的全局感知特性,设置全网中最先获取所有需求数据的节点视为建立新区块的节点。同时,为了保证数据的安全性,本文通过对比验证特征值及索引值实现数据区块的快速验证。区块链网络中所有认证节点均可访问和更新数据区块,确认其中数据的真实可靠。

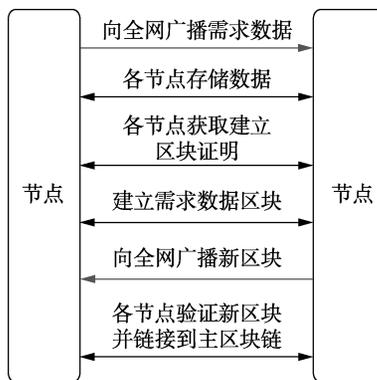


图 4 数据区块链形成过程

Fig.4 Formation process of data blockchain

在电力 CPS 中生成的数据区块不仅包含感知数据的原始信息,还包含该类数据的特征及索引值,本文通过数据特征验证,实现数据异常性判定,具体特征验证过程如下。

a. 建立数据预测模型,得到模型特征。

电力 CPS 数据预测是指利用历史电气量数据和温度、季节等气象数据等预测未来时间段内的电力数据值。给定包含 N_1 个训练数据的集合 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{N_1}, y_{N_1})\}$, 基于极限学习机的预测模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} f = \min_{\beta} \|\delta\|_1 + \frac{1}{\kappa} \|\beta\|_2^2 \\ Y - H\beta = \delta \end{cases} \quad (1)$$

其中, H 为模型中隐层输出矩阵; β 为隐层节点与输出神经元的输出权值矩阵; Y 为输出值矩阵; δ 为训练误差; κ 为调节系数, 用以权衡训练误差和输出权值。

b. 依据模型特征求得预测值。

根据求解得到的基于极限学习机的预测模型, 预测得到下一时刻各个样本点来自于数据源的预测值。

c. 设定波动阈值, 验证实际值。

依据历史数据集的预测数据, 设置基于模型特征环节验证过程的误差阈值范围 σ 为历史数据集中预测结果的各样本点残差的最大值, 进而可判定实时量测数据是否异常。

由图 4 可知, 从终端感知器获取数据到数据保存至区块主链的过程中, 至少需要经过 2 次全网广播。且随着网络规模复杂程度及网络节点数的增加, 数据区块验证传输过程的时间尺度占比也变得越来越大, 而针对电力 CPS 保护控制等实时性需求业务, 保障数据在 P2P 网络中的传输和处理时间变得非常重要。因此, 本文在节点传输数据过程中引入排队论理念和先来先服务 FCFS (First Come First Served) 机制。考虑采集的数据到达区块链节点是概率事件, 本文将数据传输过程视为排队论过程, 并建立数据分组丢包重传机制模型。对等节点的数据传输时间模型如下: 数据到达节点视为服从泊松分布, 平均速率设为 λ ; 节点按照先进先出的方式进行数据分组转发, 转发速率为 μ , 服从指数分布^[19]; $\rho = \lambda/\mu$ 为节点的服务强度。节点缓存容量配置为 m , 则节点对分组数据的处理过程设置为 $m/m/1/k$ 混合制排队模型。结合文献[20]得到对应的网络性能参数, 包括丢包率 P_{loss} 和在节点中的延时时间 T_{delay} , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{loss}} = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+1}} \rho^m \\ T_{\text{delay}} = \frac{L_s}{\bar{\rho}} = \frac{\rho}{\lambda(1-P_{\text{loss}})} \frac{(m+1)\rho^{m+1}}{1-\rho^{m+1}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, L_s 、 $\bar{\rho}$ 分别为节点中平均等待队长和平均服务

强度。在节点到节点之间传输数据的时间模型不仅考虑了在节点处排队处理分组数据, 而且考虑了分组数据包的丢失及重传机制, 其中数据发送节点 s 到数据接收节点 d 间经过 k 个转发节点。进而得到本文从节点到节点数据传输时间为:

$$T_{s-d} = T_{\text{basic}} + T_{\text{node}} = \sum_{i=1}^{k+1} T_{\text{link}i} + \sum_{j=1}^k T_{\text{node}j} = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{L_i}{v} + \sum_{j=1}^k (T_{\text{delay}j} + P_{\text{loss}j} t_{\text{wait}j}^m) \quad (3)$$

其中, T_{basic} 、 T_{node} 分别为网络中链路时延和节点时延, 节点到节点的数据传输时间包含节点对之间无排队等待和丢包情况下的基本传输时间和分组数据在节点中排队处理和重传的时间, 本文中的基本传输时间主要考虑传输层物理链路中数据传输时间; L_i 为节点对之间经过的第 i 条链路的长度; v 为数据在传输路径中的传输速度; $t_{\text{wait}j}^m$ 为分组数据重传等待时间。

区块链节点均能感知获取发送节点集传输数据到达本节点的状态, 对于节点 i 而言, 将感知发送节点数据成功传输的时间记为 T_{s-i} 。因此将区块链网络中 $\min\{\max(T_{s1-i}, T_{s2-i}, \dots, T_{sn-i})\}$ 的节点作为生成数据区块的节点, 并向全网发送验证的数据区块。

(2) 智能合约。

本文中的智能合约包含注册合约和数据按需传输合约。其中, 注册合约基于事件驱动, 在系统中新增感知器或终端场景下, 触发注册合约。将感知器或终端的接入位置等信息在区块链系统中映射为全网唯一标识, 保证数据获取源的可靠性。数据获取合约基于事件驱动和时间驱动 2 种机制。在常规状态下, 运行时间驱动机制。综合电网数据采集系统时间设置, 设每间隔 15 min 形成一个新的数据区块。当系统中业务需求来临时, 基于事件驱动机制触发数据按需传输合约。每一个需求的智能合约包含业务需求的容忍时间、感知器号、感知器所采集的数据类型和时间尺度以及各个节点进行数据传输的路径集合。事件驱动机制中数据按需传输合约自动执行数据按需求在 P2P 网络中进行传输, 同时, 发送节点用自身的私钥进行数字签名, 保证传输数据的完整性, 并满足业务对数据质量的容忍保证。

2.2 数据按需驱动传输模型

典型区块链技术应用用于交易记账, 其对实时性无过多要求, 每个区块的生成过程需 10~15 min。然而电力 CPS 有实时性业务需求, 在缩短共识机制的基础上, 同时需要在 P2P 网络数据传输时间方面有保障。本文考虑生成数据区块的广播数据过程中单一链路负载过大, 造成拥塞, 使得传输数据信息丢失带来重复传输和验证造成数据获取时间变大, 从而导致无法响应电力 CPS 的业务需求, 设计了一种

数据按需驱动的传输模型。通过引入数据传输时延和网络负载均衡度的概念,并以负载均衡度和传输时延最小为目标建立数据按需驱动传输的数学模型,满足全网范围内按电力 CPS 业务对数据传输的时延需求,同时达到负载均衡,降低网络拥塞的可能性,提升数据区块的生成速度。

P2P 网络负载均衡度的计算公式为:

$$l_{LoadBp2p} = \sqrt{\frac{\sum (R_{Bi} - \bar{R}_B)^2}{n_1}} \quad (4)$$

其中, R_{Bi} 为 P2P 源节点到其余目的节点路径上的剩余带宽; \bar{R}_B 为所有链路上剩余带宽的均值; n_1 为所有使用链路的条数。

因此,结合节点到节点传输时间的分析过程,建立数据按需驱动传输的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min l_{LoadBp2p} \\ \text{s.t. } T_{s-d} \leq T_{delaybr} \\ R_{Bi} \geq 0 \\ h_{Hops-d} \leq h_{Hopbr} \\ \sum D(n_{Nodei})_{in} = \sum D(n_{Nodei})_{out} \end{cases} \quad (5)$$

其中, T_{s-d} 和 h_{Hops-d} 分别为从源节点到目的节点的传输时间和跳数; $T_{delaybr}$ 、 h_{Hopbr} 分别为节点对之间的时延约束和跳数约束; $D(n_{Nodei})_{in}$ 、 $D(n_{Nodei})_{out}$ 分别为节点 i 的流入数据量和流出数据量。约束条件从上至下依次为针对不同业务需求策略寻找的传输时延不大于业务需求时间约束、传输链路的剩余带宽约束、传输路径的跳数最大上限约束、节点转发数据量守恒约束(即流入节点的数据量等于流出节点的数据量)。

2.3 模型求解方法

数据区块传输时间主要受链路长度和排队处理时间的影响。因此,本文通过降低传输链路长度和排队时间来降低数据区块 P2P 网络的传输时间。主要采取均衡网络负载机制,将重负载链路上的传输数据转移到轻负载链路,得到满足时延约束的数据传输路径。数据按需驱动传输算法的具体流程描述如图 5 所示。

由于电力 CPS 中从源节点到每个目的节点间存在着多条时延相等或者相近的链路,因此,在满足约束条件的基础上迁移数据传输路径,则能够实现链路中轻、重负载的均衡。

3 算法性能评测分析

3.1 实验算例描述

以 IEEE 14、30、39、57、118 节点 5 种规模的标准系统为算例,验证本文所提数据区块链生成算法的性能。在系统中,遵循 IEEE 标准电网结构的物理

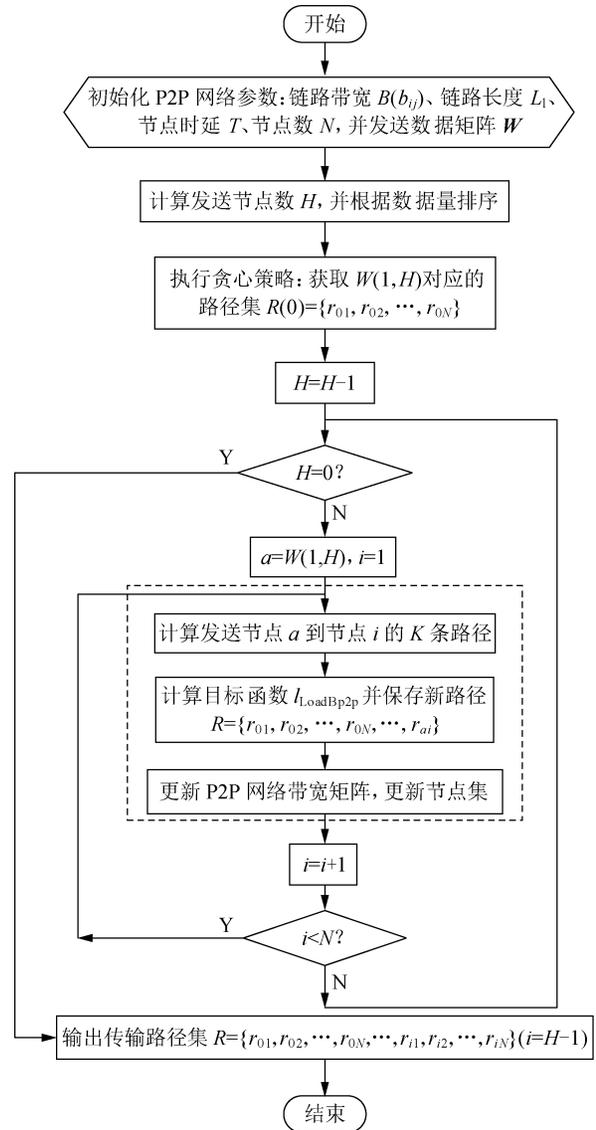


图 5 数据传输算法流程图

Fig.5 Flowchart of data transmission algorithm

区域布设自治终端。具有相同地理位置的多个电网节点只布设一个数据获取和区块生成终端,并且对等节点间 P2P 通信链路的走向遵循 IEEE 电网电气连接关系,保证网络中各个节点均能实现逻辑连接。为了更真实地反映数据区块在对等节点内数据交换和 P2P 网络中的数据传输过程,本文采用 NS2-2.35 仿真软件进行测试,其是 UC Berkeley 开发的公认网络仿真平台。实验系统参数设置如下:操作系统版本为 Ubuntu12.04, NS2 版本为 NS2-2.35,流量产生器为 CBR, CBR 发包速率为 1 Mbit/s,数据包大小为 1 000 Byte, P2P 网络传输速率为 10 Mbit/s,节点服务模型为 $m/m/1/k$ 。

实验算例中电力 CPS 的需求业务包括发电机运行、系统参与用户的局部线路潮流分布数据及用户侧智能电表数据等非实时性数据,以及应用于稳态分析、潮流计算、状态估计、实时决策等实时性量测数据。与文献[16-17]中的数据传输

算法进行比较,验证本文所提数据传输方法的有效性。

3.2 不同规模电力 CPS 数据区块生成

在数据真实性比对环节,本文以某城市的实际用电负荷、温度、湿度数据进行预测误差分析,选取的数据样本为 1 月份每隔 15 min 采集一次电力负荷数据,对于该整个自然月的历史负荷数据集,选取其中的 3/5 作为训练样本用以预测模型,剩下的 2/5 作为测试数据,其中预测模型输入环节主要考虑历史数据集中温度和湿度 2 个气象特征对负荷的影响,即输入特征向量包括时间、温度、湿度、用电负荷。然后采用极限学习机(ELM)预测模型和支持向量机(SVM)预测模型进行全天电力负荷数据预测,得到电力负荷预测结果如图 6 所示。

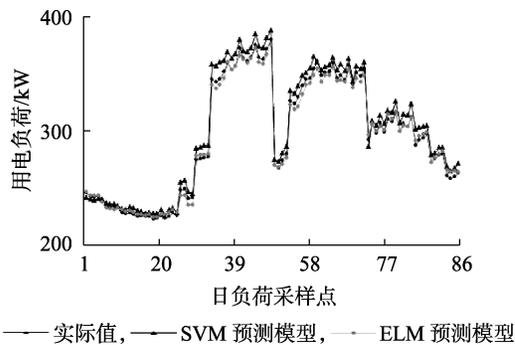


图 6 负荷预测结果

Fig.6 Predictive results of power load

从图 6 中可以看出,基于极限学习机模型的数据预测平均相对误差为 0.98%,最大相对误差为 2.78%,而支持向量机模型的数据预测平均相对误差为 2.28%,最大相对误差为 4.8%,证明了本文选择的基于极限学习机模型的预测方法的有效性。根据预测误差结果,设定实际采样值和预测数据的误差阈值 σ 为 8.28,然后对下一时刻采集到的量测数据进行阈值比对分析并判断该数据是否异常。

在私有化数据区块链的生成数据区块环节,本文以 IEEE 14、30、39、57、118 不同规模的标准电网系统进行实验分析,设置数据来源于发电机、变压器及系统关键节点中监测采集的功率、电压、电流等电气量数据,并结合 WAMS 对全网的运行状态进行监控,数据发送节点布置则依据最优相量测量单元(PMU)布置原则。在图 7 所示的 IEEE 14 节点标准系统中,设定对等节点 2、6、9 获取发电机、变压器、线路和设备数据。而各 IEEE 标准系统的数据对等节点和数据量设定如表 1 所示。

通过在不同规模系统中进行算法仿真,并与文献[16-17]中所提出的数据传输算法进行比较,得到区块链建立时间如图 8 所示。图中,每个系统的 3 个条形从左至右分别对应文献[16]算法、文献[17]

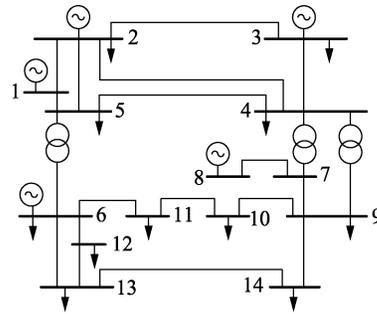


图 7 IEEE 14 节点标准系统

Fig.7 Standard IEEE 14-bus system

表 1 IEEE 14、30、39、57、118 节点系统参数设置

Table 1 Parameter setting of IEEE 14-, 30-, 39-, 57- and 118-bus systems

系统	生成节点	数据量/MByte
IEEE 14	2, 6, 9	12, 8, 16
IEEE 30	1, 2, 10, 12, 15, 20, 27	5, 4, 6, 7, 8, 10, 12
IEEE 39	3, 8, 13, 16, 20, 23, 25, 29	5, 4, 7, 13, 8, 6, 12, 10
IEEE 57	1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54	2, 4, 12, 10, 9, 7, 6, 11, 5, 3, 8
IEEE 118	3, 8, 11, 12, 19, 22, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110	2, 5, 3, 6, 2, 2, 1, 1, 2, 4, 4, 1, 2, 4, 3, 4, 3, 1, 2, 6, 3

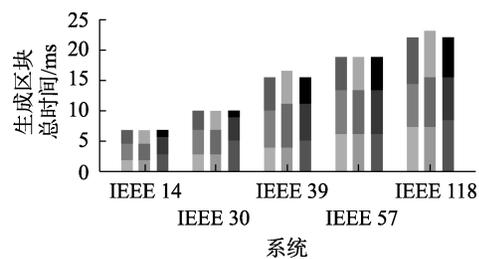


图 8 各系统数据区块建链时间

Fig.8 Data block generation time of each system

算法、本文算法;每个条形从下至上分别对应数据发送时间、验证区块时间和重叠时间。数据区块建链过程包括数据发送节点第一次广播传输数据到各个节点的用时和网络中优先获取所有数据的节点生成新区块并第二次广播至全网验证的时间。由于 2 次广播时间存在重叠,因此,减去重叠时间即是建立数据区块的整体时间。各环节时间关系如图 9 所示。图中, $T_{Blockchain}$ 、 T_{Data} 、 T_{block} 分别为区块链中生成数据区块的时间、节点间数据传输时间和数据区块验证时间; $T_{node, send}$ 、 $T_{node, receive}$ 分别为节点间发送数据和接收数据的时间点。

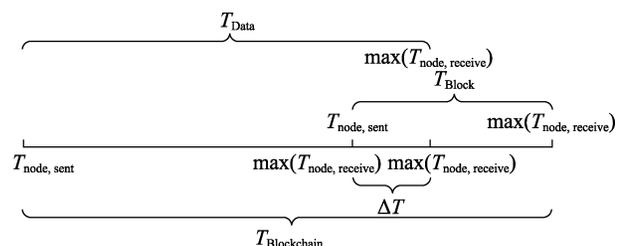


图 9 建立数据区块时间

Fig.9 Generation time of data block

由图 8 的实验数据可知,对比 3 种算法,数据区块链建链时间能够满足 WAMS 的 20 ms 时延上限的需求。进一步分析 P2P 网络的负载均衡指标,仿真结果如表 2 所示。由于本文所提算法考虑了数据区块链传输过程中的全网负载均衡,网络负载均衡指标相比其他 2 种算法有明显下降,并且随着网络规模的增加,其优势更明显,5 种规模电网场景下,本文算法比文献[16]的算法不均衡度降低了 34.12%,比文献[17]的算法不均衡度降低 23.82%。均衡地使用网络资源将减少重载情况下网络拥塞和丢包的发生概率,提高网络的整体性能。

表 2 各系统 P2P 网络负载均衡指标

系统	负载均衡指标		
	文献[16]算法	文献[17]算法	本文算法
IEEE 14	7.19	6.96	4.83
IEEE 30	13.32	11.05	8.23
IEEE 39	17.67	15.61	11.80
IEEE 57	19.14	15.35	13.99
IEEE 118	24.55	21.16	14.87

为了更好地分析电力 CPS 数据区块链生成过程算法的执行性能,本文进一步给出了数据区块链在网交换和传输的吞吐量,如图 10 所示。

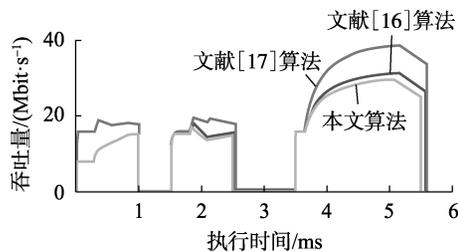


图 10 数据区块生成节点吞吐量

Fig.10 Throughput of data block generation node

由网络核心区域节点实时吞吐量数据曲线可知,本文算法有效地分摊了交换传输的数据区块量,从而降低了节点负载,即吞吐量较文献[16]、[17]算法有所降低。并且由每段传输结束时间可知,本文算法有效地缩短了传输时间。

4 结论

面向电力 CPS 对数据的高安全和高可信性需求,本文提出一种基于区块链技术的电力 CPS 数据区块链生成算法。由于区块链的典型架构并未充分考虑电力 CPS 中数据自身的私有化特性,本文采用排队论及数据特征快速比对方案降低共识机制时间,并设计了一种数据按需驱动传输策略以保证 P2P 网络的负载均衡,提升区块链在电力 CPS 中应用的时效性。采用 5 种不同规模 IEEE 标准算例对算法进行验证,实验结果表明所提算法具有更短的数据区块链建链时间,同时能保证数据交换的负载均衡,进

而有效地提升电力 CPS 数据传输系统的性能。

参考文献:

- [1] LEE E A. Cyber-physical systems-are computing foundations adequate[J]. Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical System: Research Motivation, Techniques and Roadmap, 2006, 2: 1-9.
- [2] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):1-8. ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [3] DAVIS K R, DAVIS C M, ZONOUS S A, et al. A cyber-physical modeling and assessment framework for power grid infrastructures [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2464-2475.
- [4] 李培恺,曹勇,辛焕海,等. 配电网信息物理系统协同控制架构探讨[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):2-7. LI Peikai, CAO Yong, XIN Huanhai, et al. Discussion on cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 2-7.
- [5] FALAHATI B, FU Y. Reliability assessment of smart grids considering indirect cyber-power interdependencies [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1677-1685.
- [6] 邓良辰,刘艳丽,余贻鑫,等. 考虑故障处理全过程的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(12): 22-29. DENG Liangchen, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Reliability assessment of distribution network CPS considering whole fault processing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 22-29.
- [7] ZYSKIND G, NATHAN O, PENTLAND A. Decentralizing privacy: using blockchain to protect personal data [C] // IEEE Security and Privacy Workshops. San Jose, CA, USA: IEEE, 2015: 180-184.
- [8] 苏大威,李云鹏,黄小钰,等. 配用电统一数据采集与信息支撑平台架构设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(9): 166-172. SU Dawei, LI Yunpeng, HUANG Xiaoshu, et al. Architecture design of unified data collection and information support platform for power distribution and utilization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 166-172.
- [9] 聂晓波,詹庆才,段刚,等. 跨调度中心 WAMS 动态数据的新颖互联互通方案及关键技术 [J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2839-2844. NIE Xiaobo, ZHAN Qingcai, DUAN Gang, et al. A new type interconnection scheme and key technology for WAMS dynamic data of trans-dispatching center [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2839-2844.
- [10] 康小宁,刘琳,王琦. 基于 WAMS 的后备距离保护方案 [J]. 电力自动化设备,2015,35(3): 75-80. KANG Xiaoning, LIU Lin, WANG Qi. Backup distance protection scheme based on WAMS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 75-80.
- [11] 白永祥,房大中,侯佑华,等. 调度中心大规模风电场实时在线监控系统 [J]. 电力自动化设备,2010,30(11): 6-9. BAI Yongxiang, FANG Dazhong, HOU Youhua, et al. Real-time online monitoring and control system in dispatch center for large-scale wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 6-9.
- [12] 赵赫,李晓风,占礼葵,等. 基于区块链技术的采样机器人数据保护方法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(增

- 刊1):216-219.
ZHAO He, LI Xiaofeng, ZHAN Likui, et al. Data integrity protection method for microorganism sampling robots based on blockchain technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2015, 43(Supplement 1): 216-219.
- [13] 张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15):4011-4022.
- [14] 袁勇,王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4):481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4):481-494.
- [15] GUNGOR V C, SAHIN D, KOC AK T, et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1):28-42.
- [16] 王建平,王梦彪,王金玲,等. 智能配电网通信实时性与可靠性 QoS 路由机制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 187-193.
WANG Jianping, WANG Mengbiao, WANG Jinling, et al. Research on real-time and reliability of intelligent distribution networks QoS routing mechanism[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(3): 187-193.
- [17] 王文华,贾晓纯,陈兴渝. 基于平衡树的智能电网数据采集路由算法[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(增刊):41-44.
WANG Wenhua, JIA Xiaochun, CHEN Xingyu. Balanced tree based routing algorithm for smart grid data collection[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(Supplement):41-44.
- [18] 唐长兵,杨珍,郑忠龙,等. PoW 共识算法中的博弈困境分析与优化[J]. 自动化学报, 2017, 43(9):1520-1531.
TANG Changbing, YANG Zhen, ZHENG Zhonglong, et al. Game dilemma analysis and optimization of PoW consensus algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9):1520-1531.
- [19] 徐志强,陆俊,翟峰,等. 智能配用电多业务汇聚的通信带宽预测[J]. 电网技术, 2015, 39(3):712-716.
XU Zhiqiang, LU Jun, ZHAI Feng, et al. Communication bandwidth prediction of aggregation of multi-services for smart power distribution and utilization[J]. Power System Technology, 2015, 39(3):712-716.
- [20] 陆传赉. 排队论[M]. 2版. 北京:北京邮电大学出版社, 2009: 31-59.

作者简介:



杨 挺

杨 挺(1979—),男,天津人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力信息物理系统(**E-mail**: yangting@tju.edu.cn);

赵俊杰(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电力信息通信与大数据分析(**E-mail**: zhaojunjie_chris@163.com);

张卫欣(1973—),女,天津人,高级工程师,硕士,研究方向为电测量、用电信息采集等(**E-mail**: hangweixin_cn@126.com);

赵英杰(1993—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为电力信息通信与大数据分析(**E-mail**: 651427357@163.com);

盆海波(1989—),男,内蒙古赤峰市人,博士后,通信作者,研究方向为信息物理系统规划、数据分析与挖掘(**E-mail**: penhaibo@tju.edu.cn)。

Data blockchain generation algorithm of cyber physical power system

YANG Ting¹, ZHAO Junjie¹, ZHANG Weixin², ZHAO Yingjie¹, PEN Haibo¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300384, China)

Abstract: With the development of cyber physical power system, the traditional centralized data acquisition architecture has the shortcomings of poor transparency, high data security risk, and so on, so based on the decentralization, security and credibility of blockchain, a data blockchain generation algorithm of cyber physical power system is proposed to improve the security and trusting degree in the data interaction and using process. The chain generation architecture of data block is established based on the privatization characteristic of cyber physical power system data. The chain generation rate is improved by the queuing mechanism in generating block nodes and the on-demand routing data exchange mechanism among nodes, which is combined with the characteristics of the data feature verification mechanism and the privatized blockchain to ensure the real-time transmission and storage of data. The proposed algorithm is verified by five IEEE standard examples with different scales and the simulative results show that the proposed algorithm has shorter data blockchain generation time and better transmission performance.

Key words: cyber physical power system; blockchain; queuing theory; on-demand routing transmission