

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191613

基于区块链技术的充电桩运维系统研究

杨玉博, 卢达, 白静芬, 赵莎

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 面对电动汽车大规模推广应用对充电桩高效运维管理的需求, 首先在介绍区块链技术基本原理的基础上, 分析了充电桩运维系统的高分布性、多主体性和高可信性特征, 归纳了区块链技术在充电桩运维系统上的应用价值, 然后构建了基于联盟链式结构、采用 PBFT 共识机制、包含完全和不完全两类节点的区块链充电桩运维系统。最后, 结合具体应用场景给出了系统在服务层、管理层和数据结构层各个层面的详细功能。为充电桩、配电站、运维机构、检定机构和监管部门等多边利益主体构思了一种基于区块链的端到端透明化、高可信性的去中心化管理模式, 为区块链技术在充电桩运维系统的落地实施提供了参考。

关键词: 电动汽车; 充电桩; 区块链; 运维

Research on a blockchain-based charging pile maintenance system

YANG Yubo, LU Da, BAI Jingfen, ZHAO Sha

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Given the demands of high efficiency maintenance of charging piles in large-scale electric vehicle application, this paper, based on the basic principle of the blockchain, analyses the high distributive, multi-agent, and highly reliable features of the charging piles maintenance system first. Then it continues with the application value of a blockchain in a charging piles maintenance system. Thirdly, a blockchain-based charging piles maintenance system is proposed by using alliance chain style, adopting a PBFT consensus mechanism, and including complete & incomplete nodes. Finally, according to specific application scenarios, the functions of the proposed blockchain-based charging piles maintenance system are analyzed from the aspects of service, management and data structure levels. The proposed blockchain-based charging piles maintenance system is able to provide an end-to-end transparent and high reliability management mode for multi-agents including the charging pile, power distribution station, maintenance, calibration and supervision institutions. This provides an example of the implementation of blockchain technology in a charging pile maintenance system.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 52110418001P).

Key words: electric vehicle; charging pile; Blockchain; maintenance

0 引言

电动化是汽车产业的发展趋势和潮流, 纯电驱动是我国汽车产业战略转型的方向^[1-2]。充电桩是支撑电动汽车大规模产业化推广的关键基础设施。广义的充电桩的运维系统涵盖充电桩运行状态的实时监控、计量精度和安全性的检定、与配售电机构之

间的负荷分配和结算管理、与监管部门之间的数据报备和补贴发放等多环节, 同时涉及充电桩、配售电机构、运维机构、检定机构和监管部门等多边利益主体。如何构建一个高度灵活、高度可靠、低运行成本, 能够为多边利益主体提供端到端透明化和高可信性数据的管理系统, 是关系到国计民生的重大问题^[3-7]。

针对电动汽车充电桩的群控操作管理, 文献[8]结合“互联网+”技术提出了手机 APP、在线卡和离线卡三种支付方式兼容的充电方法, 通过在软件

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助 (52110418001P)

实现上采用模块化设计、规范充电流程，实现了数据流通过消息总线机制在各模块间的传输以及充电桩群中任意两个充电桩的组合充电。为了缓解充电行业的发展对充电设备维护带来的压力，文献[9]提出一种基于曼哈顿距离法的充电桩远程运维系统，采用基于曼哈顿距离法对比分析运维检修人员距离故障发生地点的距离，进行运维人员的优化调度，提高了电动汽车充电桩的运维水平，实现了对运维人员及检修人员行为的高效管控。文献[10]在深入分析电动汽车充电桩集群管理系统的通信需求和对比典型通信方式的基础上，针对充电桩集群的应用环境提出一种基于地理位置信息的高效 WSN 路由机制 GLAR，实现了最小跳路由，在一定程度上缓解了“热区”问题。通过采用蒙特卡洛模拟法模拟用户充电需求，对 GLAR 和 LEACH 的性能进行了仿真和对比分析。研究表明，GLAR 算法在平均传输时延、网络吞吐量和扩展性等性能上表现优异，能够满足集群管理系统对数据通信服务性能的需求。文献[11]从充电桩架构的角度入手，分析充电桩的现状与存在的问题，通过架构设计、功能定义、标准体系、业务流程及应用案例的对比分析完成了充电桩的技术方案设计，在兼顾扩展和安全的条件下，保障了充电桩产品的标准化，可以有效提高电动汽车充电桩充电服务能力，降低充电桩运营成本。文献[12-14]研究了电动汽车充电桩的充电优化模式、充电桩优化配置。

上述方法，不同角度解决了充电桩运维系统存在的问题，但是均沿用传统的中心化管理模式，与充电桩运维系统固有的高分布性和多主体性之间存在着天然的矛盾。面对大规模电动汽车推广应用对充电桩的高效运维管理需求，本文将在介绍区块链技术基本原理的基础上，分析充电桩运维系统典型特征，归纳区块链技术在充电桩运维系统上的应用价值，从链式结构、共识机制、节点划分、功能定义层面入手，提出基于区块链技术的充电桩运维系统，结合其具体应用场景，实现高度自治管理、高可靠、端对端透明、可追溯的充电桩运维管理。

1 区块链基本原理

1.1 区块链数据结构

狭义来讲，区块链(Blockchain)是一种按照时间顺序将数据区块以顺序相连的方式组合成的一种链式数据结构，并以密码学方式保证不可篡改和不可伪造的分布式账本。广义来讲，区块链技术是利用块链式数据结构来验证与存储数据、利用分布式节点共识算法来生成和更新数据、利用密码学的方式

保证数据传输和访问的安全、利用由自动化脚本代码组成的智能合约来编程和操作数据的一种全新的分布式基础架构与计算范式^[15]。

区块是链式结构的基本数据单元，如图 1 所示，每个区块由父区块哈希值(Previous Hash)、时间戳(Time Stamp)、默克尔树根(Merkel Tree Root)和加密数据(Enciphered Data)构成，其中父区块哈希值是根据父区块数据按照散列算法计算出一个固定长度字符串。哈希算法的特性保证了区块链的哈希值可以唯一、准确地标识一个区块，任何节点可以通过快速的哈希运算检验其哈希值的正确性，依次来确认区块的内容是否被篡改。同时，每个区块包含了父区块的哈希值，首尾相连，将所有的区块串联起来，形成区块链^[16]。默克尔树根为当前所有区块数据信息构成的哈希二叉树的根哈希值，它使得区块头只需包含根哈希值而不必封装所有底层数据，使得哈希运算可以高效地运行在低功耗终端设备上，同时实现了在非完整区块链网络节点情况下的数据检验^[17-20]。

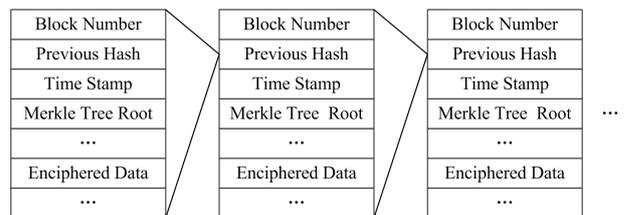


图 1 区块链数据结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the block chain

1.2 数字签名

基于上述基本区块数据结构可知，区块链可以实现数据的链式存储与传输。此外，为了满足安全性和所有权验证，区块链技术通常使用 RSA、Elgamal、Rabin、D-H、ECC 等非对称方法进行数据加密处理，从而实现用其中一个密钥(公钥或者私钥)进行加密后，只有另一个对应的密钥才能解开^[21-22]。在区块链技术领域，这种非对称加密也成为数字签名，其技术原理如图 2 所示。发送方对原始数据通过哈希算法计算数字摘要，使用非对称密钥对中的私钥对数字摘要进行加密，加密后的数据成为数字签名。在接收到数字签名的原始数据后，接收方首先使用公钥，对数字签名进行解密，得到原始摘要值，然后根据同样的哈希算法计算摘要值，并通过对比判定两者是否一致，如一致则签名通过。在区块链系统中，每个数据节点均拥有一对公钥和私钥，节点发送数据时，利用私钥对数据进行签名，并将签名附加在数据中。其他节点收到数据后，首

先对数据中的签名进行验证, 完成数据完整性校验及合法性校验后才认可数据^[16]。

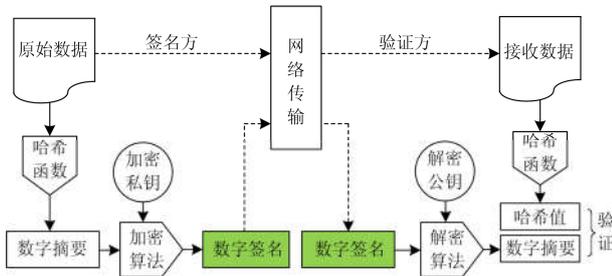


图 2 数字签名技术原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the digital signature technology

1.3 共识机制

在区块链系统中, 所有的节点都参与数据的存储, 共识机制可保证所有节点都保存有相同的正确数据。当前区块链系统的共识算法大致可分为工作量证明类(Proof of Work, PoW)共识算法、Po*凭证类共识算法、拜占庭容错(Byzantine Fault Tolerance, BTF)算法和可执行环境共识算法^[16, 20]。

上述区块链基本数据结构、数字签名和共识算法机制共同赋予了区块链系统以下特征:(1) 去中心化。系统中的所有节点均为对等节点, 平等地发送、接收、存储、维护系统中的所有数据, 从而节点间均是透明、公平和可信的。(2) 不可篡改。由于所有节点均参与数据的存储和维护, 数据一经验证达成共识被写入区块后, 区块链系统利用哈希函数的单向性、数字签名的防伪认证功能和分布式共识的容错能力, 任何节点无法对数据进行篡改, 同时也增加了攻击者恶意篡改、伪造、删除数据的难度。(3) 可追溯性。区块链数据结构中的时间戳以及链式数据存储结构, 为数据提供了时间维度, 便于检索数据库从源头到最新状态之间的完整变更过程。(4) 高可靠性。系统中的每一个节点均对等地维护数据并参与到整个系统的共识中, 单一节点出现故障不会对系统的运行造成任何影响。同时, 区块链系统采用非对称密码学对各节点敏感数据进行加密, 仅有有权限节点才能访问或者使用, 保证了区块链数据具有极高的安全性和隐私性。

2 基于区块链的充电桩运维系统

2.1 场景分析

典型的充电桩运维系统由充电桩、充电站、现场检测箱、检定机构、供电公司、运维机构和监管部门等主体构成。整个系统呈现出以下特征:(1) 高分布性。充电桩通常根据人口密度、交通状况等因

素分散于城市的各个位置, 部分场合甚至仅由一两台充电桩构成, 集中管理困难。(2) 多主体性。充电桩、配电站、运维机构、检定机构和监管部门通常属于多边利益主体, 难以用固定的中心化管理平台实现多边利益均衡。(3) 高可信性。由于典型的充电桩运维系统涉及多边利益主体, 只有当各主体间存在高度互信环境时, 系统才能协调工作。例如计量检定机构与供电公司、计量检定机构与充电方之间的可信性关系到用电结算和充电结算、运维机构与监管机构之间的可信性关系到补贴发放、数据统计。

基于充电桩运维系统的上述特征, 区块链技术在该系统的应用价值主要体现在:(1) 利用智能合约实现分布式管理。基于区块链技术的智能合约充电桩运维系统提供了高度灵活、高度可靠、低运行成本的自治管理网络, 智能合约通过将预定义的规则向区块链系统发出信号, 适时地启动交易规则, 确保交易和数据的自治管理。例如: 充电桩自动向检定机构发出维保请求、运营方与供电公司的自主结算、监管方与运营方的自主补贴、充电桩监测数据的实时上传、区块链系统的周期性共识维护。

(2) 不依赖于第三方的去中心化管理。分属于不同利益主体的充电桩、配电站、运维机构、检定机构和监管部门在区块链系统中均为对等节点, 平等地发送、接收和维护系统中所有的交易数据, 避免了中心化管理系统的固有缺陷。(3) 端到端透明化和高可信性。区块链的特有数据结构和共识算法, 保障了充电桩实时监测数据、检定数据和计量数据的高度透明化传输、可追溯查询和不可篡改性, 检定机构和监管部门能实时从区块链上获得真实可信的数据, 避免“计量不准”、“骗补”等情况的发生。

2.2 系统节点构架

结合充电桩运维系统特征和区块链技术的应用价值, 从链式选型、节点布置、共识机制来分析基于区块链的充电桩运维系统构架。

1) 链式选型

一般而言, 根据区块链网络范围以及参与节点的特征, 区块链可分为公有链、联盟链和私有链。

比特币系统是典型的共有链, 其开放性最强, 任何人或者机构不需要授权就可以自由加入或离开公有链系统, 是完全意义上的去中心化区块链, 一般通过数字加密和算法激励机制在完全陌生的网络环境下建立一种非最终一致性的共识。由于共有链允许匿名参与以及基于 PoW 的共识机制, 在安全性、效率以及隐私性方面存在的问题, 不适合于充电桩运维系统^[23]。

私有链是指不对外开放、封闭的区块链系统,

通常节点数量较少，一般为组织内部使用的、节点间互信度很高的区块链系统，节点的加入、退出、授权等行为均由组织决定。私有链通常采用 Paxos、Raft 等即时确认共识算法，具有较高的运行效率和更好的隐私性能，但是私有链也存在系统构架固定、节点的加入、退出程序繁琐等问题，不适合于区域内充电桩、现场检测箱灵活加入与退出。

联盟链是介于共有链和私有链之间的第三种链式结构，其通常应用于多个身份互相已知的组织之间，记账等核心功能由特定的内部节点完成，其余外部节点仅能提供、查询与自身相关的局部信息。联盟链的效率较公有链大幅提升，同时具有更好的安全隐私保护性能、不需要代币激励，在信息的确认同步、安全性等方面明显要优于公共链。相较于私有链，其灵活性又大幅提升，便于充电桩、现场检测箱的灵活加入与退出，因此适合于充电桩运维场景。

2) 节点布置

区块链系统中，节点不仅承担着数据的发送、加密、验证和存储，同时还担负着系统的管理任务。理论上，区块链系统中的各网络节点是完全平等的，所承担的功能及拥有的权限是同样的。但是结合充电桩运维系统中各节点的运算能力、功耗及应用特征，不同类型的节点作相应的功能划分，并将系统节点分为完全节点和不完全节点。

完全节点为标准的区块链节点，承担数据的发送、接收、记账、同步、共识等功能。在基于区块链的充电桩运维系统中，运维机构、检定机构、配电公司和监管部门承担完全节点角色。

不完全节点主要用于完成数据的采集和传输功能，接受网内其他节点的数据信息，仅存储相邻节点地址信息和区块头信息，具备完成简化认证协议 (Security Protocol Verifier, SPV) 的能力，不参与记账、系统维护、同步、共识等功能^[23]。在基于区块链的充电桩运维系统中，充电桩及现场检测箱承担不完全节点角色。

基于上述分析，所提出的基于区块链技术的充电桩运维系统网络节点示意如图 3 所示。

基于区块链技术的充电桩运维系统是一个典型的分布式对等网络系统，如何保障节点之间的数据一致性，避免因遭受系统攻击、传输故障造成的稳定性或者安全性问题，是区块链共识机制所要解决的问题。

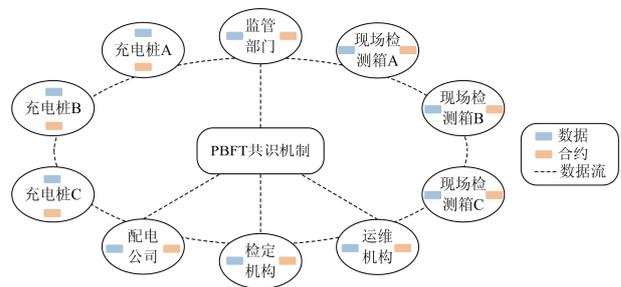


图 3 充电桩区块链运维系统网络节点示意图

Fig. 3 Nodes of the blockchain based charging pile maintenance system

3) PBFT 共识机制

PoW 类的共识算法的核心思想是记账权的节点竞争，对于每一批次的记账都赋予一个难题，只有能够解出该难题的节点挖出的区块才是有效的，即“挖矿”。PoW 共识算法避免了建立和维护中心化信用机构的高额成本，只要保证 51% 以上的节点是安全的，即可依靠算力来保持区块链的一致性。但是这种机制浪费了大量的算力，消耗掉了大量的电能，并且信息处理速率有限，并不适用于充电桩运维这类需要低算力、高效、低成本的共识计算应用场景^[20]。

实用拜占庭容错 (Practical Byzantine Fault Tolerance, PBFT) 是由 Miguel Castro 和 Barbara Liskov 提出的一种异步网络共识算法，可提供 $(n-1)/3$ 的容错能力，同时大幅提升了区块链系统的响应速率，具有较强的实用性^[24-25]。

在 PBFT 算法中，所有的副本 p 在视图的配置更换中完成状态变迁。令 m 为数据， $d = D(m)$ 为数据 m 的哈希值， v 为视图编号， $|R|$ 为当前区块链系统数据副本集合数量，主节点由 $p = v \text{ mode } |R|$ 计算得到^[24,26]。当主节点失效时，PBFT 的视图迁移过程如图 4 所示。

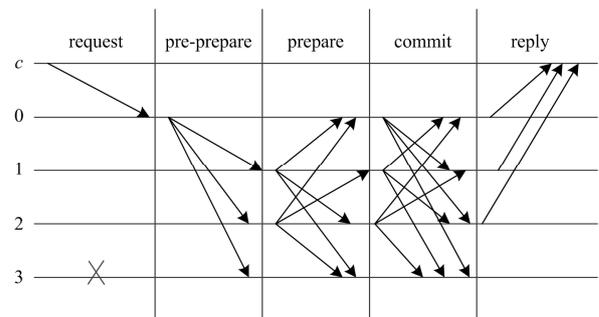


图 4 PBFT 执行过程

Fig. 4 Operation process of the PBFT

① 请求阶段(request): 客户端 c 向主节点发送请求 $\langle \text{REQUEST}, v, m, d \rangle$;

② 预准备阶段(pre-prepare): 主节点验证哈希值后, 为收到的请求分配序列号 n , 并通过广播将预准备消息 $\langle \text{PRE-PREPARE}, v, n, d \rangle$ 发送给其他节点, n 为主节点为该请求分配的编号, $n=1, 2, 3, \dots, N$, N 为区块链系统节点数量;

③ 准备阶段(prepare): 其余节点验证预准备消息哈希值后, 确认是否接受过序号为 n 但是哈希值 d 不同的数据 m 。如接收过, 则放弃该消息, 否则向所有其他节点发送准备消息 $\langle \text{PREPARE}, v, n, d, i \rangle$;

④ 确认(commit)阶段: 各节点验证收到的准备信息, 向主节点外的其余节点发送确认消息 $\langle \text{COMMIT}, v, n, d, i \rangle$;

⑤ 各节点验证确认消息后, 向客户端 c 回复 $\langle \text{REPLY}, v, i, r \rangle$ 。 c 需要等待 $f+1$ 个来自不同节点的不同响应并通过哈希值验证和结果验证(f 为失效节点数量), 作为整个 PBFT 的执行结果。

2.3 系统功能构架

由下至上, 充电桩运维系统可分为服务层、管理层和数据接口层, 如图 5 所示。

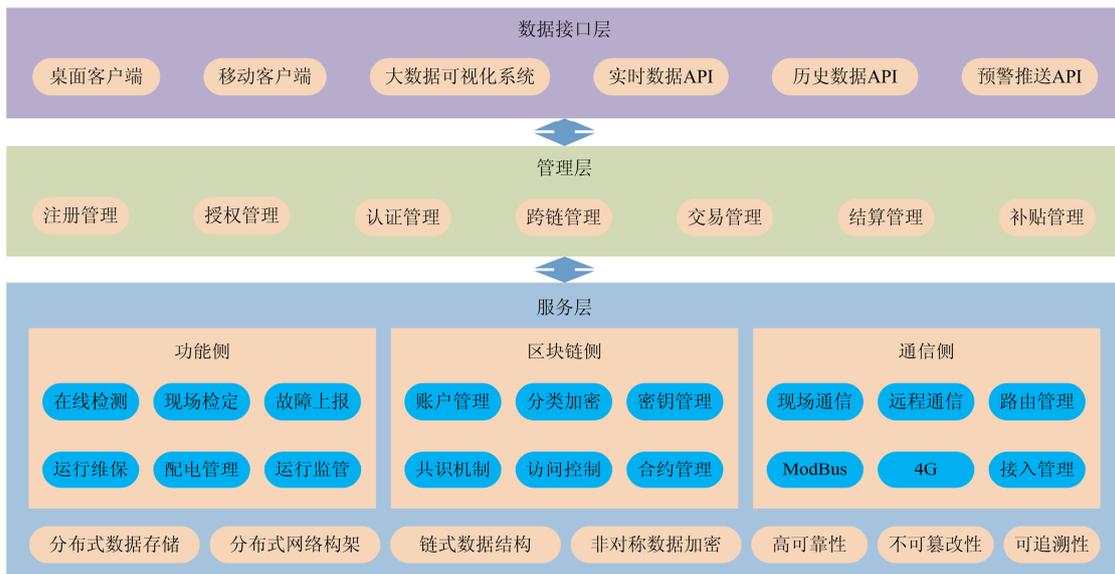


图 5 充电桩区块链运维系统功能构架示意图

Fig. 5 Functions of the blockchain based charging pile maintenance system

服务层主要提供功能侧、区块链侧和通信侧的具体服务。功能侧主要包含运行于充电桩运维系统中的各项基本功能, 包含充电桩的在线实时检测、现场检定、配电管理、运行维保、故障上报与运行监管等功能; 区块链侧主要提供与核心区块链服务, 包含账户管理、分类加密、密钥管理、共识机制、访问控制和合约管理; 通信侧主要提供现场通信、远程通信、路由管理, 具体总线方式上包含: 现场检测箱与计算机通信所采用的 ModBus 总线(传输电参量、工作误差、充电量显示误差、计费误差和时间误差等相关数据); 现场检测箱、充电桩和检定机构、监管部门、运维机构、配电公司之间的 4G 通信(传输充电桩实时故障信息、用电负荷、检定状态等信息)。同时, 通信侧还负责新节点(主要是充电桩和现场检测箱的接入管理)。

管理层主要提供充电桩运维系统的以下服务: 应用层面的充电桩注册和现场检测箱注册管理、不

同节点和不同业务类型的授权管理和认证管理、与智能电网区块链/电动汽车区块链之间的跨链管理、充电/维保以及检定交易管理、充电桩与配电机构之间的结算管理以及监管部门与运维机构之间的补贴管理。

数据接口层主要提供包含桌面客户端、移动客户端、大数据可视化系统三种类型的服务端口, 以及便于第三方开发的实时数据应用程序接口 (Application Program Interface, API)、历史数据 API、预警推送 API。桌面客户端可根据不同的应用场景划分为充电桩检测装置远程管理平台、检定平台、用电结算平台、补贴发放平台、用电负荷监控平台等。

基于上述技术和功能特征, 形成了具有分布式数据存储、分布式网络构架、链式数据结构、采用非对称加密的高可靠性、不可篡改、可追溯的充电桩运维系统, 保障了交易和数据的自治管理, 为充电桩、配电站、运维机构、检定机构和监管部门等

多边利益主体提供了端到端透明化和高可信性的去中心化管理模式。

3 结论

充电桩运维系统具有高分布性、多主体性和高可信性特征, 面对大规模电动汽车推广应用对充电桩的高效运维管理需求, 本文在分析充电桩运维系统典型特征的基础之上, 归纳了区块链技术在充电桩运维系统上的应用价值, 进而构建了基于联盟链式结构、采用 PBFT 共识机制、包含完全和不完全两类节点的区块链充电桩运维系统, 并给出了该系统在服务层、管理层和数据结构层各个层面的详细功能, 为充电桩、配电站、运维机构、检定机构和监管部门等多边利益主体构思了一种基于区块链的端到端透明化、高可信性的去中心化管理模式, 为区块链技术在充电桩运维系统的落地实施提供了参考。

区块链是代表着未来生产关系发展方向的新型数字形态, 习近平总书记在主持中央政治局第十八次集体学习时指出:“要抓住区块链技术融合、功能拓展、产业细分的契机, 发挥区块链在促进数据共享、优化业务流程、降低运营成本、提升协同效率、建设可信体系等方面的作用”, 区块链技术所蕴含的去中心化分布式协同机制与充电桩运维系统的高分布性、多主体性和高可信性完美匹配, 本文所提出的基于区块链技术的充电桩运维系统为区块链技术的落地提供了一种有效尝试。下一步的研究工作将重点围绕如何开发基于区块链技术的充电桩运维系统工程实例, 进一步完善技术细节, 健全系统构架。

参考文献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 新能源汽车产业发展规划(2021-2035 年)(征求意见稿)[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1278117/n1648113/c7553623/part/7553637.pdf>.
Ministry of Industry and Information Technology. New energy vehicle industry development plan (2021-2035) (Draft for Comments) [EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1278117/n1648113/c7553623/part/7553637.pdf>.
- [2] 徐顺刚, 王金平, 许建平. 一种延长电动汽车蓄电池寿命的均衡充电控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 43-48, 17.
XU Shungang, WANG Jinping, XU Jianping. An equalizing charge control strategy to extend battery cycle life for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 43-48, 17.
- [3] CHEN H, HU Z, LUO H, et al. Design and planning of a multiple-charger multiple-port charging system for PEV charging station[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 173-183.
- [4] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [5] SUN Z, ZHOU X, DU J, et al. When traffic flow meets power flow: on charging station deployment with budget constraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 2915-2926.
- [6] LIAO Y T, LU C N. Dispatch of EV charging station energy resources for sustainable mobility[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 86-93.
- [7] GUSRIALDI A, QU Z, SIMAAN M A. Distributed scheduling and cooperative control for charging of electric vehicles at highway service stations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(10): 1-15.
- [8] 胡道栋, 杨校辉, 克潇, 等. 充电桩群控操作管理单元的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 141-147.
HU Daodong, YANG Xiaohui, KE Xiao, et al. Design and implementation of charging pile group operation management unit[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 141-147.
- [9] 郭葳, 尹新涛, 王俊霞, 等. 基于曼哈顿距离法的充电桩远程运维系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 134-140.
GUO Wei, YIN Xintao, WANG Junxia, et al. Design of long-distance operation and maintenance system of charging pile based on Manhattan distance method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 134-140.
- [10] 周凯, 杨晓东, 张有兵, 等. 适于电动汽车充电桩集群管理系统的 WSN 路由算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 17-28.
ZHOU Kai, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. An effective WSN routing protocol for electric vehicle charging piles management system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 17-28.
- [11] 李洪峰, 李红霞, 陈志刚, 等. 一种新型电动汽车充电桩技术方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 142-147.
LI Hongfeng, LI Hongxia, CHEN Zhigang, et al. Discussion on technology scheme of a new EV charging

- pile[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 142-147.
- [12] 刘星平, 李世军, 于浩明, 等. 住宅小区内电动汽车有序充电优化模式[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 244-251.
LIU Xingping, LI Shijun, YU Haoming, et al. Coordinated charging optimization mode of electric vehicles in the residential area[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 244-251.
- [13] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 电动出租车充电桩优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 181-188.
ZHANG Di, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Optimal configuration of charging spots for electric taxis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 181-188.
- [14] 陶顺, 肖湘宁, 温剑锋, 等. 电动汽车分散充电设施配比度分析与计算方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 11-19.
TAO Shun, XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, et al. Configuration ratio for distributed electrical vehicle charging infrastructures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 11-19.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. 2018 中国区块链产业白皮书[EB/OL]. [2018-05]. <http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146402/n1146445/c6180238/content.html>.
Ministry of Industry and Information Technology. 2018 China blockchain industry white paper[EB/OL]. [2018-05]. <http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146402/n1146445/c6180238/content.html>.
- [16] 华为区块链技术开发团队. 区块链技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [17] 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): 3-16.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 3-16.
- [18] 韩璇, 袁勇, 王飞跃. 区块链安全问题: 研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 206-225.
HAN Xuan, YUAN Yong, WANG Feiyue. Security problems on blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 206-225.
- [19] 袁勇, 倪晓春, 曾帅, 等. 区块链共识算法的发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2011-2022.
YUAN Yong, NI Xiaochun, ZENG Shuai, et al. Blockchain consensus algorithms: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2011-2022.
- [20] 李彬, 曹望璋, 张洁, 等. 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 183-193.
LI Bin, CAO Wangzhang, ZHANG Jie, et al. Transaction system and key technologies of multi-energy system based on heterogeneous blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 183-193.
- [21] 祁兵, 夏琰, 李彬, 等. 基于区块链激励机制的光伏交易机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 170-180, 203.
QI Bing, XIA Yan, LI Bin, et al. Photovoltaic trading mechanism design based on blockchain-based incentive mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 170-180, 203.
- [22] 袁勇, 周涛, 周傲英, 等. 区块链技术: 从数据智能到知识[J]. 自动化学报[J]. 2017, 43(9): 1485-1490.
YUAN Yong, ZHOU Tao, ZHOU Aoying, et al. Blockchain technology: from data intelligence to knowledge automation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 43(9): 1485-1490.
- [23] 丁腾波, 刘宏波, 陶佳, 等. 区块链技术在智慧能源体系中的应用研究[J]. 发电技术, 2019, 40(5): 403-412.
DING Tengbo, LIU Hongbo, TAO Jia, et al. Application of block chain technology in intelligent energy system[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(5): 403-412.
- [24] CASTRO M, LISKOV B. Practical Byzantine fault tolerance[C] // Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 1999, 99: 173-186.
- [25] 袁勇, 王飞跃. 区块链理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [26] 凌力. 解构区块链[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.

收稿日期: 2019-12-28; 修回日期: 2020-03-04

作者简介:

杨玉博(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电测量技术; E-mail: yangyb3333@163.com

卢达(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电测量, 自动化。E-mail: 413263095@qq.com

(编辑 周金梅)