

# 主侧链技术及其能源互联网应用综述

于 伟<sup>1</sup>, 杭静文<sup>1,2</sup>, 郭 佳<sup>1</sup>, 艾崧溥<sup>3</sup>, 梁 宏<sup>4</sup>, 曹军威<sup>4</sup>

(1. 国网数字科技控股有限公司, 北京 100053)

(2. 国网区块链科技(北京)有限公司, 北京 100053)

(3. 中国信息通信研究院北京泰尔英福科技有限公司 iF-Labs, 北京 100083)

(4. 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

**[摘要]** 对主侧链技术的 5 种模式进行了综述, 分析其中的优缺点, 重点讨论主侧链技术的应用场景, 并结合能源互联网领域发展的最新趋势和需求, 认为能源互联网具有分布式、分散、多能源协调和金融市场化的特点, 这些特征和区块链技术概念彼此一致, 但很多现有研究是在简单或单一场景下对区块链应用的讨论, 有必要对同一场景下、不同场景之间的各个区块链之间的交互进行讨论, 以满足相应的信息交互需求. 为了满足能源互联网中角色、内容和级别不同的数据和服务交互的不同需求, 将侧链技术集成到能源互联网中至关重要. 并以两种典型的应用场景为例, 给出了侧链技术在能源领域的具体应用架构.

**[关键词]** 区块链, 侧链, 能源互联网, 分布式系统

**[中图分类号]** TP311.13 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2023)03-0009-10

## Main-Side Chain Technology and Its Applications in Energy Internet

Yu Wei<sup>1</sup>, Hang Jingwen<sup>1,2</sup>, Guo Jia<sup>1</sup>, Ai Songpu<sup>3</sup>, Liang Hong<sup>4</sup>, Cao Junwei<sup>4</sup>

(1. State Grid Digital Technology Holding Co., Ltd., Beijing 100053, China)

(2. State Grid Blockchain Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100053, China)

(3. iF-Labs, Beijing Teleinfo Technology Co., Ltd., China Academy of Information and

Communications Technology (CAICT), Beijing 100083, China)

(4. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A review is conducted on the five modes of main-side chain technology including the detailed discussion on its application scenarios as well as their advantages and disadvantages. Considering the up-to-date trend and demands in the development, it is believed that the energy Internet is characterized by the distribution, the decentralization, the multi-energy coordination and the financial marketization which are consistent with the concepts of blockchain. Although existing studies in applications mainly focus on simple or single scenarios, it is necessary to discuss the interaction between various blockchains inside one scenario and between various scenarios to meet the information exchange needs. It is crucial to integrate side chain technology into the energy internet in order to satisfy the different data and service interactions among different roles, content, and layers in the energy internet. Two typical application scenarios is given as examples to demonstrate the specific application architecture of side-chain technology in the energy field.

**Key words:** blockchain, side-chain, energy internet, distributed systems

区块链的技术架构使其天然地可以具有高度透明、去中心化、去信任、集体维护(难以篡改)、匿名等性质, 并通过利用自动化脚本代码组成的智能合约进行编程以在节点间无完全相互信任的分布式系统中实现基于去中心化信用的交易、协调与协作, 从而为解决中心化机构普遍存在的高成本、低效率和数据存储不安全等问题提供了解决方案. 区块链技术由于其固有的性质, 为构建私密、点对点交易提供了技术基础. 在应用方面, 能源互联网具有的分布式、分散、多能源协调和金融市场化的特点与区块链技术发展方向相符, 因此区块链技术在能源互联网中的应用发展迅速. “区块链+能源”使人们看到了能源电力从底层架构到商业平台完全重构的契机<sup>[1]</sup>.

收稿日期: 2023-02-13.

通讯作者: 曹军威, 博士, 研究员, 研究方向: 能源互联网、能源区块链, E-mail: jcao@tsinghua.edu.cn

当前区块链间的交互方式有以下 3 种:

**公证人模式:**公证人模式的实现与现实世界相同,需要交互的几个区块链引入能够共同信任的第三方作为公证中介,以实现信息在链间的交互. 公证人模式机制相对简单,但同时缺陷也很明显. 公证人的引入使得链间交互成为中心化的形式,与能源互联网及区块链的分布式理念存在一些冲突. 公证人在信息网络中的负担相对较大,会给网络的扩展性与鲁棒性的提升带来困难. 公证人模式的代表性技术为瑞波 Interpledge 协议.

**哈希锁定模式:**哈希锁定模式在几个需要交互的链之间设定触发器. 触发器通常是个待披露明文的随机数的哈希值. 哈希值相当于转账暗语,只有拿到暗语的人才能获得款项. 哈希锁定模式能实现链间少量信息的交换,但不能实现跨链合约,所以其应用场景比较受限. 哈希锁定模式的代表性技术为闪电网络.

**侧链模式:**侧链模式即在需要将信息或服务从一条链传递到另一条链时采取的跨链技术. 其产生最初是为了实现比特币和以太坊网络的数字资产在多个区块链间的转移及比特币相关服务的扩容. 其使用相对复杂,但支持分布式部署与升级,且较其他模式可以交互更多信息与服务,执行更复杂的逻辑,也是目前应用较多的链间交互模式.

当前有一些对能源互联网中使用区块链的讨论,但很多都是简单场景或单一场景下对区块链的应用的讨论. 而在各个单一场景的区块链应用之上,有必要对同一场景下、不同场景之间的各个区块链之间的交互进行讨论,以满足相应的信息交互需求. 为适应海量分布式电力生产、存储设备及相关电力电子、信息、管理需求的接入,能源互联网应提供一种在供需双方之间建立快速、可信、自动的信息交互机制,以帮助供需双方高效建立和完成交互. 现有能源互联网解决方案中,大多利用中心化的管理控制机构完成. 能源互联网体系庞大,中心化管理机构任务繁重,某些情况下去中心化具有更高的效率,如家庭光伏电站的剩余电量提供给某邻居家电器使用,在双方有一定信任的基础上,可相对简便快速地完成交易,从而具有更高的效率. 由此,新的能源流通与能源数据交互范式和相应的分布式技术需要在能源网络的各个层级被考虑、探索及应用.

## 1 研究背景

### 1.1 区块链

区块链技术最初是由研究人员于 2008 年提出的,是一种通过去中心化和去信任化的方式共同维护可靠数据库的技术解决方案. 作为比特币的关键技术,随着比特币的发展,区块链迅速引起了广泛的关注和研究. 区块链是计算机技术的集成应用程序,如分布式数据存储、共识机制、点对点传输和加密算法等,简而言之是一种分布式账本技术,所有人都参与簿记<sup>[2]</sup>.

传统的区块链系统由数据层、网络层、共识层、激励层、合约层和应用层组成. 每个级别的体系结构都包含各种核心技术. 典型的技术是分布式记账、非对称加密和共识机制、智能合约等. 区块链的技术架构决定了其去中心化、匿名性、不可篡改性、开放性等特点,这些特征是快速推广区块链的基础. 根据访问机制的分类,区块链可分为公共链、联盟链和私有链. 每种类型的区块链都有其自身的优势,并已有了较为成熟的应用<sup>[3-11]</sup>.

### 1.2 能源互联网

能源互联网可以定义为使用先进的信息技术、电力电子设备和各种智能方式将大量分布式能量收集设备和能量存储设备互连的网络. 在该网络中,可以实现节点之间能量的双向流动和交易<sup>[12-13]</sup>.

传统化石资源对环境的破坏越来越严重,开发利用可再生能源是解决能源短缺和环境问题的重要手段. 随着互联网技术的飞速发展,能源互联网成为一种利用新能源的有效途径,即以互联网为载体,将新能源与整个能源系统联系起来. 能源互连的概念最早是在里夫金(Rifkin)的“第三次工业革命”中提出的<sup>[14]</sup>. 能源的相互联系是第三次工业革命的重要支撑,这一概念一经提出便得到广泛认可.

到目前为止,能源互联网已经拥有较为完整的系统架构. 微电网和分布式能源是能源互联网的基本组成部分. 微网的能量收集、存储、传输、消耗和新能源产生构成了“局域网”<sup>[15]</sup>,在以大型电网为骨干网的基础上可以访问各种分布式新能源. 大电网在传输效率和稳定性方面具有绝对优势,新能源在灵活性方面具有优势,能源互联网结合了双方的优势,并实现了自下而上的分散式协作管理模型,该模型将分散

式和集中式相结合,补充了现有的电力网络<sup>[16-17]</sup>。

综上所述,能源互联网具有 5 个特征,即可再生、分布式、互联、开放和智能化<sup>[18]</sup>。这 5 个特征是能源互联网快速发展的基础,这些特征也与区块链的去中心化、系统自治等特点具有一定程度的相似性,因此区块链技术将在能源互联网建设中发挥重要作用<sup>[19]</sup>。

## 2 侧链技术

侧链的概念最早是在 2013 年 12 月提出的,这是比特币的核心开发者提出的解决比特币区块链运作中的问题的方案<sup>[20]</sup>。比特币区块主链的操作不可篡改,一旦发生故障,将对系统产生不可估量的影响。为了减少因修改主链性能而导致失败的风险,开发者提出了一种新的侧链方法来辅助主链的功能。这种侧链构想一旦发展便发挥了重要作用,为区块链的发展打开了另一个天窗。最初的侧链基于比特币区块链作为主链进行运营和发展。到目前为止,任何主链都可以开发侧链以完成区块链之间数字资产的转移。侧链并不像其他加密货币一样排除现有系统,而是以收敛的方式实现了加密货币金融生态目标<sup>[21-22]</sup>。

### 2.1 侧链的定义

侧链的定义首先出现在侧链白皮书中,该白皮书提供了用于验证来自其他区块链的数据的区块链<sup>[23]</sup>。因此,侧链的本质仍然是区块链。但侧链具有其固有的特殊性,是所有满足侧链协议的区块链的总称,使用“锚定”技术来实现资产转移的功能。侧链具有以下特征:

- (1) 侧链可以产生与主链数字资产相对应的侧链数字资产,但不能产生主链数字资产;
- (2) 侧链需要有完整的共识机制和足够的计算能力来确保其自身的安全性;
- (3) 侧链完全独立于主链,发生的任何故障都不会影响主链的运行和维护,并完全保证主链的安全,但可与主链交互。

一般来说,侧链是连接不同区块链的路径,一个技术链与另一个技术链之间的数字资产转移是通过技术手段来实现的。根据要解决的主链问题的不同,侧链的功能形式也不同。一些侧链用于提高主链的交易效率,例如,比特币区块链侧链的开发可以解决主链上的交易确认时间过长的缺陷;一些侧链用于扩展主链的功能,从而使主链不断升级。

### 2.2 侧链与主链的关系

随着区块链行业的发展,已经产生了越来越多的新技术来适应更高的性能要求,并已应用于区块链场景,常用的有侧链、跨链、DAG、分片等技术<sup>[23]</sup>。

所有满足侧链协议的区块链都可以称为侧链,因此侧链本身也是一个区块链,但其更像是一个通道,允许不同的链彼此通信。主链是独立运行并正式启动的区块链网络。

有人将主链和侧链之间的关系与主路和辅路之间的关系进行了比较。主路代表主链,辅路代表侧链。当主路的交通流过大且拥堵时,人们会想到修建辅路以减轻主路的压力。这与侧链的开发目的一致。引入侧链可以提高主链的交易速度、扩展主链的功能以及提高主链的性能,正如将部分交通引入主路将加快主路上的交通。侧链在主链的运行和维护中起辅助作用。同时,侧链本身独立运行,若侧链存在系统漏洞或资金被盗等问题,也不会影响主链的安全性。一个主链可以具有多个侧链,侧链之间互不影响,且每个侧链向主链添加不同的辅助功能。主侧链的关系是相互影响和独立的,如图 1 所示。

### 2.3 侧链技术基础

侧链中使用的基本技术是双向锚定<sup>[20]</sup>,这是一种根据某些规则在链之间将资产进行转移的机制,也被称为“楔入式侧链”。不同于单向锚定技术,双向锚定不仅可以将数字资产从主链转移到侧链,还可以将资产从侧链重新转移回主链。当用户想要从主链中转移资产时,可以使用锚定技术暂时将加密的资产锁定在主链上,同时释放侧链上的等效资产,反之亦然。现有的双向锚定技术主要有以下几种:

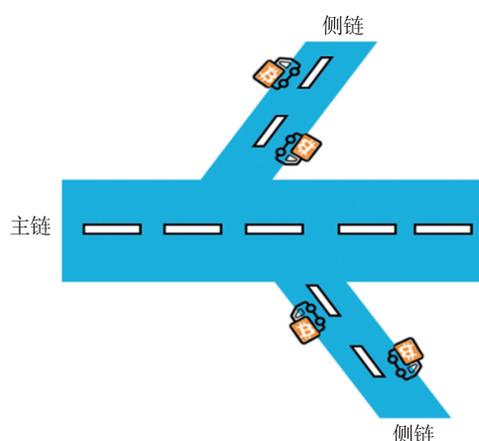


图 1 主链和侧链关系图

Fig. 1 Main-chain and side-chain

(1) SPV 模式

SPV(简单付款验证)模型是侧链白皮书中的分散式双向锚定技术的原始思想<sup>[20]</sup>,是动态成员多方签名(DMMS),发生在一类比特币系统工作量证明区块链上.此模式通过存储少量数据来验证交易的真实性.其特定工作流程是:用户将主链上的货币资产发送到链上的指定地址以锁定资产,并且为了确认交易的完成,需要将交易的输出暂时锁定,然后将创建的 SPV 认证发送给侧链.此时,侧链上将收到带有 SPV 证书的交易,以验证主链上的资产已锁定,且可在侧链上打开同等资产.将该资产的状态更新信息返回到主链,然后在主链上执行重复的操作.但该模型的一个问题是需要软分化主链.图 2 所示为 SPV 模式的详细过程.

(2) 单一托管模式

单一托管模式是最简单的双向锚定技术的实现,即将要锁定在主链中的数字资产移交给主链上的单一托管单元,这与交易所类似.当主链收到信息时,将在侧链中激活相应的资产.单一托管模式操作流程如图 3 所示.该模式操作简单,但缺点是集中化严重,对主链的可信赖性要求很高.

(3) 联盟模式

为了解决单一模式集中化的弊端,联盟模式使用多个公证人代替单个保管人,并要求由公证人组成联盟,联合签名用于加密侧链资产的流动,从而为主链的资产安全提供多重保证.但联盟模型仍依赖于联盟的信誉.联盟模式的流程图如图 4 所示.

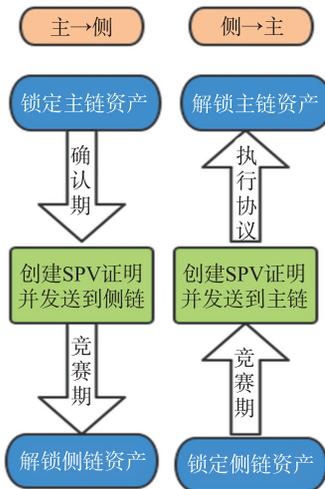


图 2 SPV 模式  
Fig. 2 SPV mode

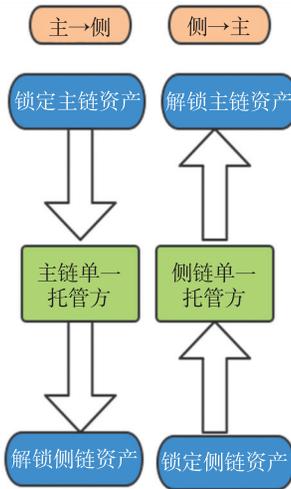


图 3 单一托管模式  
Fig. 3 Single hosting mode

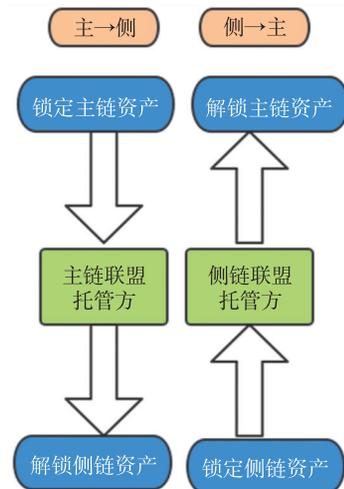


图 4 联盟模式  
Fig. 4 Alliance mode

(4) 驱动模式

Bitcoin Hivemind 的创始人 Paul Sztorc 提出了一个驱动链的概念,矿工在其中充当资金保管人,每个矿工都可以参与决定何时解锁加密的数字资产以及将资产转移到地址.当矿工收到侧链信息时,他们将根据某种共识机制执行协调协议,以确保资产流动.信用矿工的参与程度越高,系统越安全.驱动模式的缺点是操作相对复杂,且需在主链上执行软分叉.其操作流程如图 5 所示.

(5) 混合模式

混合模式是将上述几种双向锚定方法混合在一起,根据主链和侧链的独特机制,选择不同的模式,例如,主链采用联盟模式,而侧链采用 SPV 模式等.

2.4 优缺点分析

总结现有的侧链案例,发现侧链在提高主链的交易

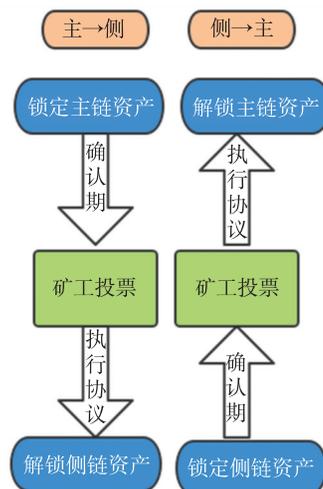


图 5 驱动模式  
Fig. 5 Drivechain mode

速度、为主链分压、数据加密、开发智能合约功能及实现金融生态目标方面具有优势。

具体而言,在确保主链安全的前提下,可在较小范围内约定侧链,以优化确认时间,从而提高交易速度。此外,当侧链与主链并行运行时,其不会导致主链上的数据和服务数量增加,且不会对主链的数据存储造成压力。侧链数据还可在专用域或主链中的较小范围内进行加密、传输和记录。侧链可以开发智能合约功能,同时提高主链的性能,锁定主网络的价值。最后,侧链以融合的方式实现了加密货币的金融生态目标,并可构建各种智能合约、期货、股票等产品,进一步扩大了主链的创新空间,从而实现对多种资产的支持。

在侧链白皮书中,也系统总结了侧链可能出现的问题<sup>[20]</sup>:

#### (1) 额外复杂度问题

侧链技术将在网络级别和资产级别上引入额外的复杂性。在网络级别上,若要支持许多独立的非同步区块链直接进行交互,则必须支持可在以后的重组中声明为无效的事务脚本,并要求程序自动检测不符合项。在资产级别上,其不再是链中的资产,而是可有与链中一样多的资产。这要求每个资产都标有源信息,以确保可以正确解析该资产。

#### (2) 欺骗性转账问题

从理论上讲,若攻击者可以进行比发送链的竞争期限更长的重组,且可在发送链取消半边转移之前在侧链之间转移货币,则任何深度的重组都是可能的。这将使接收链中的资产数量与发送链中锁定的资产数量不同。当攻击者将资产转移回原始链时,他们增加了资产,侧链上的其他用户则遭受了损失。该风险可以通过延长过渡期来任意减小。

#### (3) 挖矿中心化风险

在侧链上引入矿工将给矿工的资源带来压力,并给系统带来集中的风险。矿工使用组合挖掘方法将工作负载复用到多个区块链中以获得多个奖励。小型矿工可能无法支付每个区块链挖矿的全部成本,而大型有组织的矿工具有比较大的优势并提高了系统的集中度。

#### (4) 软分叉风险

若主链支持软分叉,为应对主链软分叉导致的回溯,其侧链需采用双向锚定的方式与主链互相检查。由于信息等的隔离是使用锚定侧链的目标之一,因此采用双向锚定的侧链可能会丧失主链对该侧链的隔离。

## 2.5 典型应用场景

为解决区块链性能限制而开发的侧链技术既可基于主链运行,也可独立于主链运行。当前的主要应用场景专注于解决主链拥塞和部署智能合约等<sup>[24]</sup>。

#### (1) 解决主链拥堵,扩大账本整体容量

引入侧链可大幅度缓解因主链入链数据需求量大而导致的拥堵。例如,在大额转账时使用主链渠道,因为大额转账通常不关心费用和网络拥堵的弊端;在小额转账时通过侧链进行,因为小额转账不需要太多的计算能力,可以实现以低廉的费用来达到数秒即可到账的效果。进一步地,引入侧链可在主链之外提供更灵活的入链手段,并大幅扩充分布式账本的整体容量。通过接入不同的侧链,技术上可以容许异构链通过主链形成共识与交互,业务上可以更好地支持特性化应用。

#### (2) 灵活部署智能合约,提升系统性能

尽管当前几乎所有区块链都已支持基本的智能合约功能,但主链由于其综合性、通用性,难以为每项业务的智能合约提供针对性设计与部署。借助侧链技术,可以将主链的智能合约灵活性部署更为聚集到侧链,从而在保留主链资源和性能限制的同时,在侧链上进一步扩展区块链技术的应用范围和创新空间。通过接入不同的侧链,技术上可以容许异构链通过主链形成共识与交互,业务上可以更好地支持特性化应用,各节点、参与方可更好地分层级进行管理。

#### (3) 基于业务调整共识节奏,降低成本

根据业务场景,侧链可以灵活调整共识节奏。侧链的出现使得主链可以把部分交易转移到侧链上,在小范围内达成共识,加快/降低共识周期,降低交易成本,提高交易效率。还可以减轻子链节点的共识、通信、存储等性能压力,降低部署成本。

(4) 提高系统安全性

侧链是相对独立的,若侧链上出现了代码漏洞和大量资金被盗等问题,主链的安全性和稳定性在监管下可不受影响,用户不必担心主链的安全性,多条侧链同时运行也不会对主链造成影响。

### 3 区块链的能源互联网应用

区块链技术可以为具有复杂的销售、交易和价值分配网络环境的能源互联网提供基础设施<sup>[25-29]</sup>,可以帮助提高交易效率并降低交易成本。在电力行业,区块链技术和智能合约有助于消除整个价值链的痛点和摩擦。但因为安全性、可伸缩性和治理问题仍然存在,所以区块链技术仍处于起步阶段。当前能源互联网中区块链的应用需求可分为以下 3 种主要方式:

(1) 如图 6 所示,在传统中心化电力系统中协调所产生的大规模数据吞吐。该需求包括生产端的发电与电力供应数据的安全上链以实现安全的数据可视化、精确化管理,以及现有电力体系下可再生能源发电相关数据(包括发电上网、交易、补助等)的自动化、半自动化的记录上链等。在现有电网的电力传输与配送中,也有利用区块链技术以实现电力自动化批量交易的需求;以及结合物联网、边缘计算等技术以实现电网各部状态数据的中心化感知与管控,提升电网弹性。在终端用户层面上,区块链可以实现终端用户与电网的点对点近实时自动化交互,简化交易环节,加快交易过程;电动汽车与智慧家居设备也可通过区块链与电网无缝交互,实现更多灵活的人性化需求。

其中区块链应用的主要模式为利用其分布式可并行执行、可追溯、不可篡改、集体维护的特点,以智能合约可按规定逻辑自动化批量执行的特点,来辅助、升级现有电力系统中的数据收集、处理、展示系统,以实现自动化处理、简化/加速业务流程的目的。

(2) 如图 7 所示,在拥有产销者的新型小区中提供点对点微网建设所需的基础设施。该需求包括对各节点所产销的电力进行自动化记录(结合物联网、边缘计算等技术)、实时点对点电力自动化交易与记录等。通过基于区块链的小区能源交易平台微电网实现实时自动平衡供需,与外界电网对接,实时管理监控小区内电力相关基础设施(包括电动汽车充电桩)。

其中区块链应用的主要模式为利用其去中心化、去信任、可扩展、防篡改和集体维护的特点,以智能合约可按规定逻辑自动化执行的特点,来构建小区内微网中的能源交易平台。

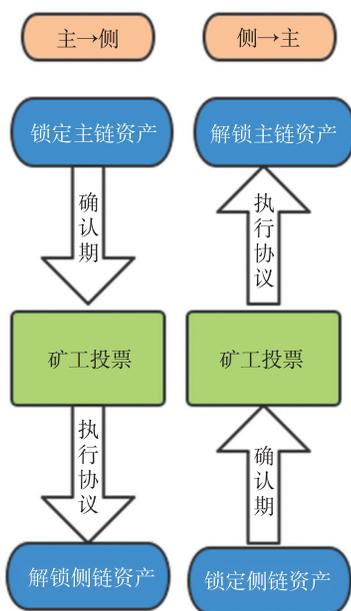


图 6 区块链的电力系统数据应用

Fig. 6 Data application of blockchain in power system

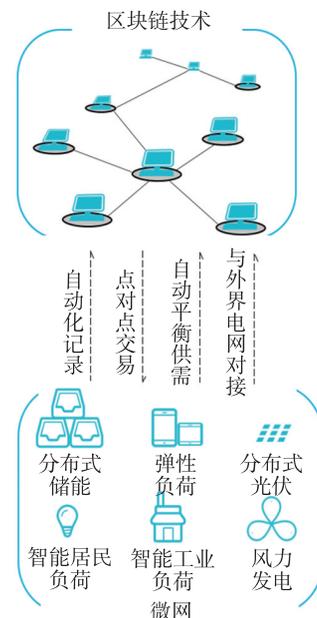


图 7 区块链的微网应用

Fig. 7 Application of blockchain on microgrid

(3) 如图 8 所示,基于电动汽车的储能属性与移动属性,在充电桩(充电站、家庭、社区或商业区等)与电动汽车间构筑电能交易、传输的数据信息层面的基础设施。该需求包括车主对电车充放电(交易)的自

动化智能控制、记录、结算等。通过与充电桩所在电力环境的有效交互,在满足电动汽车电力需求的同时利用其所储能源,平衡所在电力环境供需,削峰填谷。

其中区块链应用的主要模式为利用其去中心化、去信任、可扩展、防篡改和集体维护的特点,以智能合约可按规定逻辑自动化执行的特点,构筑一个信息交互平台,使得电动汽车既能拥有交通工具属性,又能作为电气设备为所处不同电力环境安全可靠地提升电能质量、电网弹性。

需要说明的是,在3种能源互联网的区块链应用需求和方式中,区块链应用不应独立存在。建立包含更多元主题、更多产业链角色访问和更全面数据信息的能源管理平台,将本地地整合整个产业链数据资源,促进能源信息的整合,并形成价值闭环。而打通各个基于区块链应用间的数据孤岛,在保证相对隐私的条件下,在区块链间进行数据与服务(包括确权与溯源)的分享是建设广域且有深度的能量管理平台所需要的。同时,为了适应能源互联网中常见的异构网络环境,并使基于区块链的服务可以得到适当的监管,通过预先验证可信接入的联盟链或私链的主侧链架构是能源互联网区块链应用发展的主流方向。

#### 4 侧链技术的能源互联网应用

主侧链架构是能源互联网区块链间实现跨链信息与服务交互的重要模式,通过这种模式可实现数据与服务在两个区块链之间的转移,数据或确权与溯源等服务可在第一个区块链与第二个区块链之间转移、延伸。在能源互联网中的区块链间可以设计多种/多重侧链及其与隐私保护、智能合约等技术的结合来满足不同情况下能量管理平台中不同角色、内容、层级等对数据与服务交互的需求。以下根据不同情况对主侧链的应用模式进行讨论<sup>[30-35]</sup>。

(1)若两个需要交互的区块链有地域、角色、内容方面的上下、高低关系,即其中一个区块链甲是另一个区块链乙的更广泛形式。例如,一个记录某座城市电力交易数据的区块链与一个记录其下设某组团/微网的电力交易信息的区块链,其间的联系更多的是一种上下层级的关系。

一般地,由于乙作为甲的狭窄形式,乙拥有甲所有特征,且由于乙更聚焦于某个方面,乙也会拥有甲所不需要的一些具体特征,这些具体特征在甲区块链中也许并无实用价值,所以并不需要出现在甲中而降低甲的效率。这些具体特征在乙中则可在其具体情形中体现价值。同时,这些具体特征通常会包含某些隐私相关的私密信息,这些信息也不应该暴露在更广泛的网络中。此外,主链与侧链分别是一个独立的系统,即使其中一者或其间的交互出现问题也不会影响正常工作的链的运行。

根据双方层级与相关性的紧密程度,可以采取以下两种区块链侧链模式:

(a)如图9所示,乙作为甲的侧链的形式部署运行。作为甲链在某个狭窄方向上的聚焦,乙链可在继承和复用主链甲技术的同时,也分担主链的压力。例如,若甲链为记录某座城市电力交易数据的区块链而乙链为一记录其下设某组团/微网的电力交易信息的区块链,则乙链所代表的组团/微网即可看做是甲链中的一个节点,而甲链关注的是该组团/微网与外部、高层电力系统的电力交易,乙链可以看做是该组团/微网内部各参与方之间的电力交易。

该模式适宜采用单一或联盟托管形式的主侧链架构。单一托管模式即主链与侧链双向锚定,数据或服务通过发送到主链上的单一托管方来在侧链上激活相应数据或服务。这样做的优势是主侧链关系紧密、联动性强、数据或确权与溯源等服务通讯速度快,缺点是对每个侧链来说,单一的托管方过于中心化,且主侧链间相互通讯相对直接,可维护性、扩展性与灵活性都相比其他方法更差一些。

联盟托管模式即主侧链间采用公证人联盟的形式通过多重签名对主侧链间的数据与服务交互进行确认。这样做比单一托管模式安全性更高一些,但相应的交互所需时间与复杂度会在一定程度上有所增加,且不能解决单一托管模式的其他缺陷。

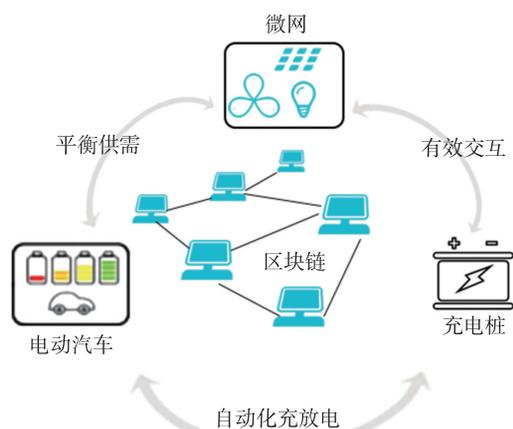


图8 区块链的电动汽车应用

Fig. 8 Application of blockchain on electric vehicle

(b)如图 10 所示,甲乙间设计一条专门用于转移数据与服务的侧链. 这意味着两条链间所有的交互皆需通过这条侧链来完成,这条侧链同时是甲、乙两链的侧链. 这样虽然乙链作为甲链在某方向的聚焦,但也可拥有大的定制潜力,可以更好地应对更复杂的聚焦环境.

这样的交互方式可以为链间数据的传输提供更灵活的服务与数据交互形式,包括更好的数据隔离,提供更好的数据与服务的安全保护,以及更好的升级与可扩展性. 该模式同样可以采用单一或联盟托管形式的主侧链架构,甲乙通过其共有的侧链来进行通讯. 但该模式的缺点在于其即使使用单一或联盟托管这两种相对强的链间联系方法仍难以与 a 中直接相联的主侧链模式的效率相比. 同时,该模式需要单独生成、维护一条单独的交互区块链,其系统成本、复杂度与交互通讯的脆弱性都会提升. 但同时甲乙两链的相互影响也会下降,单独每个链的稳定性会有所提高.

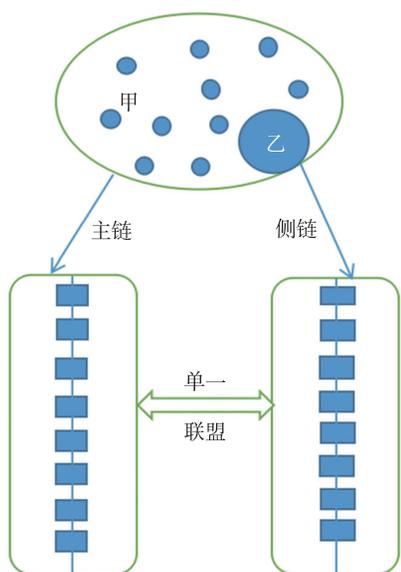


图 9 主侧链关系模式 1(a)

Fig. 9 Main-chain & side-chain relationship 1(a)

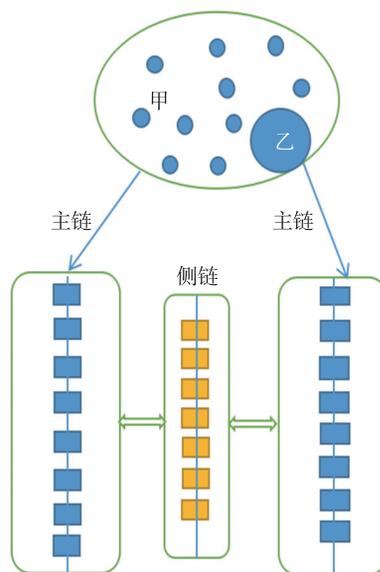


图 10 主侧链关系模式 1(b)

Fig. 10 Main-chain & side-chain relationship 1(b)

(2)若两个需要通讯的区块链为不同类别的电力区块链,即甲链与乙链在其功能、服务领域等存在区别的情况下有数据及确权与溯源等服务通讯需求的情况. 例如,拥有产销者的某新型小区中的电力交易区块链与电动车-充电桩电能交易区块链,同在该小区中部署,有在使用中对相互数据及服务调用的需求.

一般地,由于甲链与乙链相互间共同的场景特点有限及设计需求不同,所以两区块链的结构也会有所差异,且各自独立性较强;同时两链间所涉及领域不同,数据安全需求也有所不同,不适宜进行相互之间的强行直接锚定与托管. 根据此类区块链通讯需求,可采取以下两种区块链侧链模式:

(a)如图 11 所示,若甲乙电力区块链间大量使用相同的区块链网络节点,则驱动链可以是一种行之有效的主侧链通信模式. 驱动链模式,即将区块链网络中的记账节点作为链间通讯的监护人,对进行数据、服务交互的双方进行检测. 这也意味着数据和服务的监管权是放在记账节点上的,需要记账节点更多地参与到区块链与智能合约的运行中来,而不只是单独的记账.

该通讯方式可以充分利用记账节点的资源,尤其是主侧链共用相同记账节点时,可以节约记账节点间形成共识的运算时间,但同时链间的通讯也受到网络中多个记账节点的监督,安全性更高. 记账节点可更多地进行本地运算,从而提供更复杂的信息与服务的交互结构与方式,提升电力系统的智慧程度,但记账节点所面临的计算压力与包括安全性的其他需求也相应提升. 此外,驱动链模式会对参与驱动的双方都有一定程度的链上开销,对于集中于某项主要业务特别是业务包含大流量数据的区块链或许无法承受这样的额外开销. 在此种情况下,可以由两方主链的托管侧链进行驱动模式的交互.

(b)如图 12 所示,若甲乙电力区块链间无大量相同的区块链网络节点,则 SPV 模式是一种适宜尝试的链间通讯模式. SPV 是一种用于向通讯双方证明某信息存在或实现确权与溯源等服务的方法,通过少量数据即可验证某个特定区块中交易是否存在. 在 SPV 模式中,用户在一方锁定某信息或服务并被证实其成立后,包含相关信息与服务的 SPV 证明会传递到另一链上.

这样的通讯方式可相当灵活地在两个电力区块链间传递信息与服务,但其缺点也很明显,即每次通讯皆需等候该信息或服务在原区块链上被证实,这使得通讯的实时性难以被有效保证. 不过 SPV 模式在牺牲时间的同时相较驱动链模式减少了链上交互的开销,从而可以直接应用于甲乙两链的交互中.

以上以两个典型的应用场景为例,根据不同的需求,给出了侧链的不同模式在能源互联网领域的应用架构. 可以看出,侧链在能源互联网中的应用具有巨大的发展潜力.

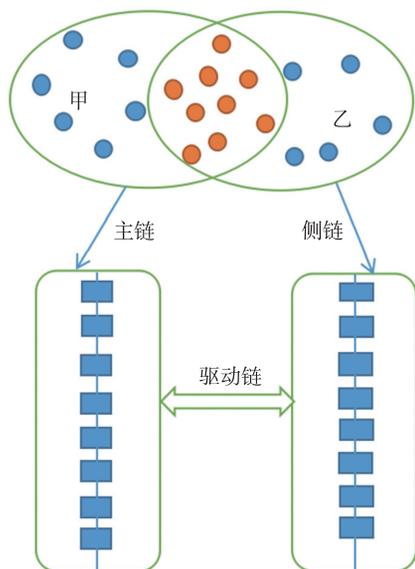


图 11 主侧链关系模式 2(a)

Fig. 11 Main-chain &amp; side-chain relationship 2(a)

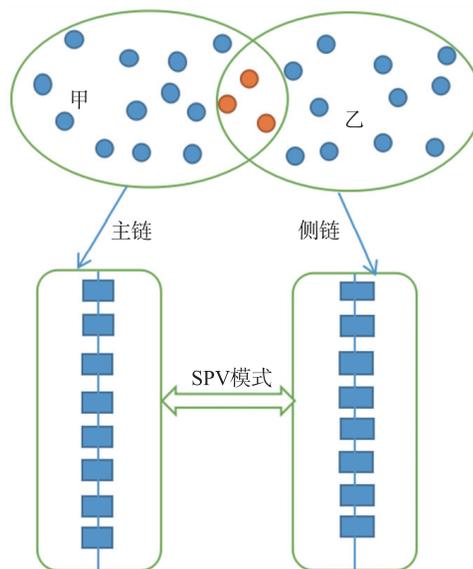


图 12 主侧链关系模式 2(b)

Fig. 12 Main-chain &amp; side-chain relationship 2(b)

## 5 结论

侧链技术的提出,为解决区块链主链的数据拥堵、提高主链的交易速度、部署智能合约等提供了有效的方法. 本文系统梳理了侧链技术理论框架,详细总结了侧链技术的核心内容. 在总结了区块链在能源互联网领域的应用场景之后,重点介绍了所规划的侧链在能源互联网领域的应用. 通过具体场景模拟,深入理解侧链的工作机制,打开研究能源互联网应用的新思路. 当然,主侧链技术因其自身存在的复杂度高、软分叉风险等问题,使其在应用过程中有一定的限制,如何在能源互联网中高效利用主侧链技术依然存在很多挑战.

### [参考文献] (References)

- [1] 颜拥,陈星莺,文福拴,等. 从能源互联网到能源区块链:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化,2022,46(2):1-14.
- [2] 白翔,许从方,柳兴,等. 区块链物联网安全技术综述及关键技术分析[J]. 信息技术,2022(10):24-30.
- [3] ZHANG L, IJZA A, XIAO P, et al. Filtered OFDM systems, algorithms and performance analysis for 5G and beyond[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(3):1205-1218.
- [4] LI Y X, CAO B, PENG M G, et al. Direct acyclic graph-based ledger for internet of things: performance and security analysis[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(4):1643-1656.
- [5] ALI O, JARADAT A, KULAKLI A, et al. A comparative study: blockchain technology utilization benefits, challenges and functionalities[J]. IEEE Access, 2021(9):12730-12749.
- [6] 许蕴韬,朱俊武,孙彬文,等. 选举供应链:基于区块链的供应链自治框架[J]. 计算机应用,2022,42(6):1770-1775.
- [7] 曾诗钦,霍如,黄韬,等. 区块链技术研究综述:原理、进展与应用[J]. 通信学报,2020,41(1):134-151.
- [8] 郭上铜,王瑞锦,张凤荔. 区块链技术原理与应用综述[J]. 计算机科学,2021,48(2):271-281.
- [9] 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.
- [10] MCBEE M P, WILCOX C. Blockchain technology: principles and applications in medical imaging[J]. Journal of Digital Imaging: the Official Journal of the Society for Computer Applications in Radiology, 2020, 33(3):726-734.

- [11] WANG S P, LI H, CHEN J J, et al. DAG blockchain-based lightweight authentication and authorization scheme for IoT devices[J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2022, 66: 103134.
- [12] 王继业, 郭经红, 曹军威, 等. 能源互联网信息通信关键技术综述[J]. *智能电网*, 2015(6): 473-485.
- [13] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4318-4328.
- [14] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命[M]. 张体伟, 孙毅宁, 译. 北京: 中信出版社, 2012.
- [15] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [16] 孙宏斌, 潘昭光, 孙勇, 等. 跨界思维在能源互联网中应用的思考与认识[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 63-72.
- [17] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [18] 孙秋野, 王一帆, 杨凌霄, 等. 比特驱动的瓦特变革——信息能源系统研究综述[J]. *自动化学报*, 2021, 47(1): 50-63.
- [19] 王骥鑫, 卢保通, 王蓓蓓, 等. 配额制背景下基于区块链的可再生能源电力追踪方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(23): 11-19.
- [20] BACK A, CORALLO M, DASHJR L, et al. Enabling blockchain innovations with pegged sidechains[EB/OL]. (2014-10-22). <https://blockstream.com/sidechains.pdf>.
- [21] SINGH A, CLICK K, PARIZI R M, et al. Sidechain technologies in blockchain networks: an examination and state-of-the-art review[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, 149: 10247.
- [22] ZHAO Y H, PENG K, XU B Y, et al. Applied engineering programs of energy blockchain in US[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 2787-2793.
- [23] DENG L P, CHEN H, ZENG J, et al. Research on cross-chain technology based on sidechain and hash-locking[C]// *Proceedings of the Second International Conference, Held as Part of the Services Conference Federation, SCF 2018*. Seattle, USA; SCF, 2018.
- [24] HEPP T, SHARINGHOUSEN M, EHRET P, et al. On-chain vs. off-chain storage for supply- and blockchain integration[J]. *Information Technology*, 2018, 60(5/6): 283-291.
- [25] 栾昊, 赵简. 区块链在能源互联网应用的前景展望[J]. *能源*, 2016(8): 70-72.
- [26] 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.
- [27] 曾鸣, 程俊, 王雨晴, 等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. *中国电机工程学报*, 2017(13): 3672-3681.
- [28] 李彬, 曹望璋, 祁兵, 等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. *电网技术*, 2017, 41(3): 736-744.
- [29] 李彬, 张洁, 祁兵, 等. 区块链: 需求侧资源参与电网互动的支撑技术[J]. *电力建设*, 2017, 38(3): 1-8.
- [30] 张朝栋, 王宝生, 邓文平. 基于侧链技术的供应链溯源系统设计[J]. *计算机工程*, 2019, 45(11): 1-8.
- [31] 沈传年. 区块链跨链技术研究综述[J]. *物联网学报*. 2022, 6(4): 183-196.
- [32] 云闯. 基于侧链技术的区块链可扩展性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [33] ZHENG Z B, XIE S A, DAI H N et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey[J]. *International Journal of Web and Grid Services*, 2018, 14(4): 352-375.
- [34] 刘晶, 朱炳旭, 梁佳杭, 等. 基于主侧链合作的区块链访问控制策略[J]. *计算机工程*, 2022, 48(3): 10-16, 22.
- [35] 徐卓嫣, 周轩. 跨链技术发展综述[J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(2): 341-346.

[责任编辑: 严海琳]