

基于实用拜占庭容错算法的多能源交互主体共识机制

王德文, 王莉鑫

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北省保定市 071003)

摘要: 为充分利用可再生能源, 实现局部消纳, 多能源系统需要紧密融合与协同运行, 形成有机整体。分析了能源供应侧、传输侧及需求侧三个层面多能源系统优化目标, 指出了多能源系统协同优化中存在难以鉴别多元数据真伪及多能源主体信誉等问题。提出了一种基于实用拜占庭容错(PBFT)算法的多能源交互主体共识方法, 分别针对能源监管主体下和能源对等主体下的能源区块链网络, 使多能源主体在不诚实和互不信任的情况下, 均可达成有效共识。设计模拟了一个由多能源主体构成的区块链网络, 实验测试结果表明, 上述方法可保证多能源主体间的有效共识, 多能源主体处理单请求的平均共识时间随着主体数量的增多而增加。另外, 对共识吞吐量的测试结果表明, 能源对等主体下的共识吞吐量大于能源监管主体下的共识吞吐量。

关键词: 多能源系统; 协同优化; 实用拜占庭容错; 共识机制; 区块链

0 引言

随着能源互联网的发展与完善, 能源的来源由传统的不可再生能源与如今被广泛挖掘的可再生分布式能源共同组成。但可再生分布式能源具有间歇性, 不能形成稳定的能源供应链, 导致各能源系统不能产生稳定的能量供应链。为提高可再生能源的利用率, 实现局部消纳, 多能源系统需紧密融合与协同优化, 形成有机整体以保证多能源系统持续稳定的运行^[1]。

多能源系统的协同优化一直是业界研究的热点且取得了可观的成果。文献[2-4]建立了能源供需两级优化模型, 以实现多能源系统用能经济性和供能成本最小化的目标。文献[5]在考虑了天然气发电具有灵活性的基础上, 建立了以低碳为目标的区域电力-天然气耦合模型。文献[6]以传输成本最低、传输损耗最小为目标进行多能流潮流优化。总体而言, 既有研究大多以能源网络整体为立足点, 而对以分布式能源网络为立足点的协同优化模型未作深入探讨。以分布式能源系统为立足点, 多能源系统协同优化的实现还面临着技术和体制层面的多种障碍, 例如多元能源数据的真实性、复杂系统的分布式决策、交互主体间的信任等^[7]。

区块链技术是一种新兴的具有强分布式特点的

技术, 与能源互联网在理念上具有天然的高契合度, 且有相关研究表明, 区块链可为解决多能源系统协同优化问题提供技术支撑^[8-9]。目前国内外均设立了能源区块链项目, 如中国的能源区块链实验室^[10]、美国的 Tansactive 项目^[11]等。除此之外, 研究者还提出了将区块链技术应用到能源领域的构想。文献[12]在大用户直购电特点的基础上, 提出了基于区块链技术的交易框架。文献[13]提出了一种基于区块链技术的弱中心化的电力交易模型。文献[14]在文献[13]的基础上, 提出了基于智能合约的去中心化配电网交易机制。可以看出, 在能源领域的既有研究大都集中在不同应用场景的交易模型上, 将区块链技术应用到多能互补与协同优化方面的研究还较有限。文献[1]提出了去中心化多能源系统协同的愿景, 认为区块链技术可为多能源系统协同提供去中心化的系统平台, 以实现调度运行去中心化, 保障数据安全可靠。文献[15]提出了基于区块链技术的能源互联网多模块协同自治模式, 基于工作量证明(PoW)共识机制的思想, 能源互联网中各主体均可利用共享的用能数据、设备参数等信息, 分别在能源利用模块、传输模块和供应模块以对应的优化目标为标准提出相应的运行策略, 并规定获得 50% 及以上认可的策略将被定为系统下一阶段的运行策略。然而, 上述文献中有效运行策略的提出依赖于相关的能源数据信息, 文中并没有针对如何保障数据真实性展开探讨。另外, 多能源系统中涉及多种能源主体, 如何在无信任机构的情况下

收稿日期: 2018-09-01; 修回日期: 2019-01-10。

上网日期: 2019-02-01。

实现多能源交互主体间的有效共识也是亟待解决的问题。

本文提出了基于实用拜占庭容错 (practical Byzantine fault tolerance, PBFT) 算法的多能源交互主体共识机制,以解决能源监管主体下与能源对等主体下协同优化中存在的难以鉴别数据真伪和多能源主体信誉等问题。

1 多能源系统协同优化

多能源系统的协同优化一直是业界研究的热点,目前在多能源系统协同优化方面的研究包含三方面:能源供给侧优化、能源传输侧优化及能源需求侧优化。

1) 能源供给侧优化。能源供给侧优化主要是指根据用能数据实现多能源系统的调度优化。通常以供能成本最低、最大化利用一次能源等为目标实现多种能源的协调运行,以发挥各能源系统间的优势互补和协同效益^[16]。但各能源系统均呈现出复杂的网络形态,且各能源系统在跨度规模、时间尺度、控制手段和储能特性等方面都存在一定的差异,难以设立中心机构对其进行统一调度,也无法使用同一标准实现控制管理^[1,17]。因此,多能源系统需要在保证与其他系统同地位的情况下达成有效共识,以保证能源供给侧优化策略的顺利提出。

2) 能源传输侧优化。能源传输侧优化主要是指多能流的潮流优化等。通常以降低运输费用、运输损耗最小、系统网络安全等为目标提出能源输送优化策略,实现能源传输侧的最优调度^[15]。传输侧优化是在能源供给侧供能数据确定的基础上,依据各能源网络输送线路等信息合理安排多能源的潮流分布情况。因此,为了保证输送策略的有效性,各能源网络输送线路等信息必须真实可靠,所涉及的多能源主体需达成有效共识。

3) 能源需求侧优化。能源需求侧优化主要是指以用户侧的用能成本最低、碳排放量最小等为目标,根据用户的电、热、天然气等需求,通过合理安排能量来源以降低用能成本。随着分布式可再生能源的加入,传统的能源消费者逐渐进化成为能源生产者,能源生产者之间也可通过能源交易降低用能成本。由此可见,能源需求侧的优化会涉及更多的多能源角色,无论是通过合理安排能量来源还是通过能源交易来降低用能成本,均需要多能源交互主体间达成有效共识,以保证能源需求侧提出有效运行策略。

综上所述,多能源系统协同优化中涉及多种能源主体的参与,在主体不诚实和主体互不信任的情况下,保证多能源交互主体达成有效共识是保障各

种能源数据信息真实可靠的基础。因此,解决多能源交互主体间的共识问题是多能源主体提出多能源系统各阶段优化运行策略的前提。

2 多能源交互主体共识机制

2.1 区块链共识机制

区块链技术是一种新兴的具有强分布式特点的技术,其核心优势是去中心化。它通过运用数据加密、分布式共识等手段实现地位对等节点之间的协作与协调,为中心化机构普遍存在的成本高、效率低等问题提供了解决方案^[18]。区块链共识机制是区块链的核心技术之一,也是分布式系统达成一致性的重要手段。众所周知,区块链具有去中心化、防篡改的高安全性能^[19],这些特性均由区块链的共识机制保证。

关于共识算法,到目前为止已有可观的研究成果。根据解决的是非拜占庭的普通错误情况还是拜占庭错误情况,将共识机制分为非拜占庭容错算法与拜占庭容错算法。Paxos 算法^[20]是 Lamport 针对分布式系统一致性问题给出的解决方案,是一种基于信息传递一致性算法。该算法具有很高的容错性能,且被应用于 Google 的 Chubby 等系统中。但由于 Paxos 算法复杂难懂,2013 年斯坦福的 Diego Ongaro 和 John Ousterhout 以易懂为目标提出了 Raft 共识算法^[21],与 Paxos 算法具有相同的容错性能。这两种算法及其变种解决的都是非拜占庭问题,因此属于非拜占庭容错算法。

针对拜占庭算法效率不高、复杂度是指数级的问题,Miguel Castro 和 Barbara Liskov 于 1999 年提出了 PBFT 算法^[22],算法复杂度为多项式级,具有极高的效率,可实现更多的落地应用,目前作为共识机制已被应用在区块链的联盟链和私有链中。随着比特币的成功应用,基于 PoW 机制被广泛关注,算法要求发起者进行一定量有难度的计算,才可得出一个容易验证的结果,其目的是让发起者消耗一定的算力,浪费一定的经济资源从而避免服务的滥用和攻击^[23]。虽然 PoW 共识机制会造成大量的算力浪费,但目前仍被认为是公有链中最好的共识算法。股权证明 (PoS) 共识机制相对于 PoW 共识机制而言是比较节能的算法,其基本原理是根据币龄决定挖矿的难度,即币龄越大挖矿难度越小,但算法易在区块链网络中失去公平性,造成中心化的结果,另外发起者挖矿难度变小,网络攻击也会随之而来。授权股权证明 (DPoS) 共识机制规避了 PoW 算力浪费和 PoS 中心化的问题,基本原理是使各节点投票选出前 100 名代表轮流依次生成区块,但整个共识

过程依靠代币实现。PoW, PoS, DPoS 共识过程都需要虚拟代币的支持,这些在能源互联网的背景下并不适用。PBFT 共识算法针对拜占庭问题且共识过程无需代币的参与,可用于具有多种能源角色的多能源系统中。

2.2 基于 PBFT 的多能源交互主体共识方法

2.2.1 基于 PBFT 的多能源交互主体共识

在多能源系统中涉及多角色能源交易,大都需要政府或行业主管部门的监管^[8]。在能源区块链中设置监管主体作为具有最高权限的多能源主体,即本文所指的能源监管主体。基于此,设计能源监管主体下的能源区块链网络,根据权限级别将多能源角色分成能源监管主体和多能源主体两类。能源监管主体在能源区块链中具有最高的权限,可为多能源主体的请求分配序号并广播到整个能源区块链网络。然而,微网、电动汽车等应用可以实现自主共识,即无需能源监管主体的参与即可达成有效共识,完全去中心化的能源区块链网络更适用于类似场景。基于此,通过取消能源监管主体,设计能源对等主体下的能源区块链网络,使多能源主体在网络中处于对等地位,均可提出并生成能源区块。

为了实现上述场景,提出了基于 PBFT 算法的多能源交互主体共识方法,并对 PBFT 算法进行相应改进使其应用在多能源系统中。

1) 改变 PBFT 算法中主节点的选取规则,使其适用于能源监管主体下的多能源交互主体共识。PBFT 算法是在分布式系统中通过投票选取主节点,一旦主节点宕机,所有节点会通过投票选出另外的主节点。本文的能源监管主体担任主节点,能源监管主体由能源交易平台等监管部门组成,监管部门轮流担任能源监管主体,即当其中一个监管部分出现问题时自动将其变更为下一监管部分。

2) 取消 PBFT 算法中的主节点身份,使其适用于能源对等主体下的多能源交互主体共识。PBFT 算法的主节点在算法中具有最高的权限,不能实现分布式系统的完全去中心化。基于此,取消了 PBFT 算法的主节点,即在多能系统中取消了能源监管主体,使能源区块链中所有的多能源主体具有同等地位,均可提出并生成能源区块。

2.2.2 能源监管主体下的多能源交互主体共识

多能源系统中存在多种能源角色主体,本节根据权限级别将多能源角色主体分成两类:第一类是能源监管主体,可由电力交易中心、能效服务商等机构担任,在能源区块链中拥有最高的权利,负责为多能源主体发送的请求排序,并向其他主体广播该请求;第二类是多能源主体,可由能源生产者与消费者

担任,例如光伏发电、电动汽车等,是指除能源监管主体之外的所有多能源角色主体,多能源主体在能源区块链中处于同等地位,均可参与多能源交互主体间的共识过程。

下文在多能源系统背景下以能源交易请求为场景,给出能源监管主体下的多能源交互主体间的共识过程,构建能源区块链网络结构图,如图 1 所示。

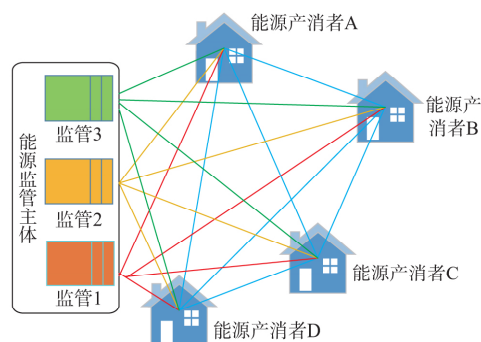


图 1 能源监管主体下的能源区块链网络结构
Fig.1 Energy blockchain network structure with the main body of energy regulation

如图 1 所示的能源区块链网络中包括能源监管主体和 4 个能源产消者主体。能源监管主体由三部分组成,每部分都可具有最高权限,依照监管 1, 2, 3 的顺序担任最高权限身份(如果监管 1 主体宕机则由监管 2 接管,以此类推)。若其中一个具有最高权限,则其他监管主体和能源产消者主体地位同等,相当于多能源主体。区块链网络中的所有主体均可互相通信,当监管 1 主体状态良好时,所有多能源主体使用红色通道与其进行通信,黄色通道和绿色通道同理。

在区块链技术支撑下,能源产消者主体发出能源交易请求,能源监管主体广播请求至全区块链网络,全网其他节点对交易请求的合法性、真实性进行验证,并通过三阶段协议确保交易请求没有被篡改,当交易请求通过验证之后,每个多能源主体可执行交易操作,并存储交易过程及结果。多能源交互主体间的一次共识过程(即多能源系统中一次交易请求的执行过程)具体可分为发出交易请求、预准备阶段、准备阶段、确认阶段和执行操作 5 个部分。在监管 1 主体状态良好的情况下,能源产消者 A 发出交易请求后多能源交互主体的执行过程具体描述如下。

步骤 1: 发出交易请求。能源产消者 A 向监管 1 发送一个交易请求。

步骤 2: 预准备阶段。监管 1 为交易请求分配序号 S , 并生成预准备消息, 定义其格式为 $T_{Pre-prepare} = \{V, S, D\}$, 其中 V 表示当前视图号, D

表示请求的摘要。监管 1 将其广播给多能源主体。

步骤 3: 准备阶段。多能源主体收到来自监管 1 广播的预准备消息后要完成两件事: ① 检查 D 是否正确, 即要保证消息没有被篡改; ② 检查序号 S 是否合法。验证通过之后, 会生成准备消息, 其格式为 $T_{\text{Prepare}} = \{V, S, D, i\}$, 其中 i 表示多能源主体的编号。多能源主体向全网广播准备消息。

步骤 4: 确认阶段。多能源主体重复步骤 3 中的验证准备消息为真后, 生成确认消息, 格式为 $T_{\text{Commit}} = \{V, S, D, i\}$ 。多能源主体向全网广播确认消息, 同时监管 1 验证消息无误后也会广播确认消息。

步骤 5: 执行操作。区块链网络中所有主体在验证完确认消息后可执行相关操作, 并生成结果消息, 格式为 $T_{\text{Reply}} = \{V, S, D, i\}$, 将其发送给能源产消费者 A, 多能源主体各自存储过程及结果。

上述多能源交互主体间的一次共识过程是无拜占庭问题的共识过程, 无宕机主体, 无虚假信息等。在多能源交互主体共识机制中针对上述问题均有相应的处理操作。首先, 在发出交易请求阶段, 设置监管主体最晚处理请求消息时间, 一旦超过这个时间, 监管主体被认为失去处理请求消息的能力, 将被其他多能源主体强制更改通道。其次, 在预准备、准备和确认阶段验证请求消息的真实合法性时, 若是不通过验证会在一定时间之后直接丢掉。能源监管主体下的多能源交互主体共识流程如图 2 所示。

在区块链网络中, 可能存在不诚实的多能源主体, 发送不合法或者是虚假的交易请求, 抑或是篡改其他多能源主体发出的交易请求。在保证多能源交互主体达成有效共识的前提下, PBFT 共识机制具有不超过 $\lfloor (n-1)/3 \rfloor$ 的容错性能, 其中 n 表示区块链网络中多能源主体的数量^[24]。所有多能源主体均会自动保障多能源系统持续稳定运行, 通过实现多能源系统的协同优化以达到自身经济优化的目的, 因此区块链中可能仅存在极少数不诚实的多能源主体。另外, 多能源主体难免会出现宕机情况, 但不超过 $\lfloor (n-1)/3 \rfloor$ 的容错性能能够满足多能源系统的稳定运行。

2.2.3 能源对等主体下的多能源交互主体共识

本节的能源区块链网络只包含多能源主体一种身份, 即不包含能源监管主体身份, 每个多能源主体均可提出并生成能源区块。在多能源系统背景下, 以能源交易请求为场景给出能源对等主体下的多能源交互主体共识过程, 能源区块链网络结构见附录 A 图 A1。

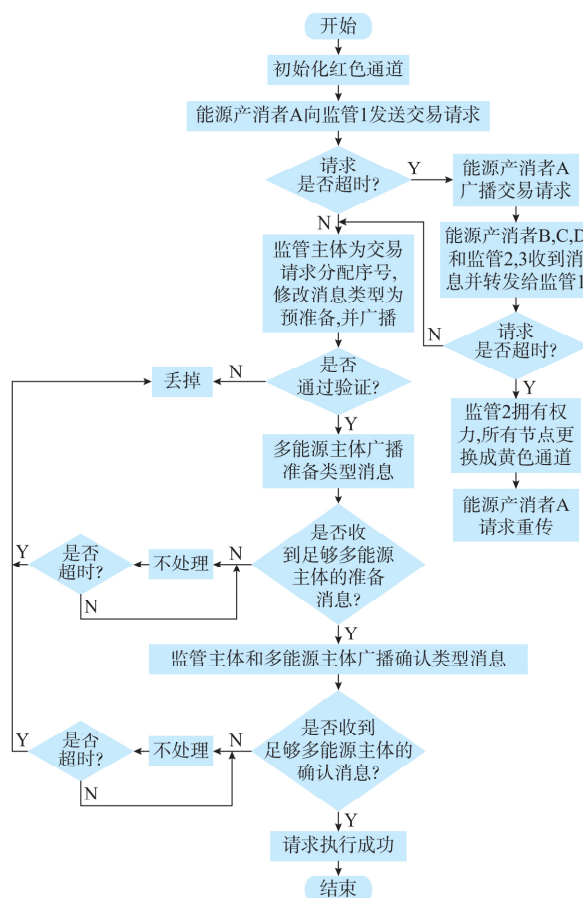


图 2 能源监管主体下的多能源交互主体共识流程
Fig.2 Consensus flow chart of multi-energy interactive subject with the main body of energy regulation

能源区块链网络中有 5 个能源产消费者主体, 不包含能源监管主体。在此网络中, 所有的能源产消费者主体具有同样的权限, 均可构建能源区块而无需等待能源监管主体分配序号, 可实现完全去中心化。

在区块链技术的支撑下, 能源产消费者主体 A 发起能源交易请求后, 多能源交互主体理想的共识过程与 2.2.2 节所述相似, 不同的是能源产消费者 A 发出交易请求, 为自己的请求分配序号 S 并生成预准备消息。

另外, 针对存在宕机主体与不诚实主体的问题有相应不同的处理。首先, 在广播准备消息之后, 如果在设置时间内未收到足够的来自其他多能源主体的准备消息, 将会直接丢掉这个请求消息, 并反馈请求执行失败消息。其次, 在广播确认消息之后, 如果在设置时间内未收到足够的来自其他多能源主体的确认消息, 则直接反馈请求执行失败消息。能源对等主体下的多能源交互主体共识流程, 如图 3 所示。

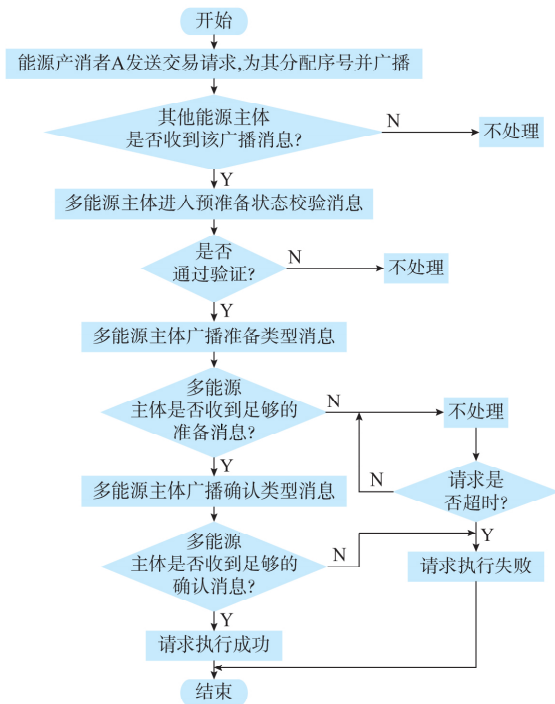


图3 能源对等主体下的多能源交互主体共识流程
Fig.3 Consensus flow chart of multi-energy interactive subject under energy peers

由图3与图2对比可见,能源对等主体下的多能源交互主体共识无需等待能源监管主体为其请求分配序号,也没有更改通道的等待时间,这在一定程度上减少了多能源交互主体达成共识的时间。然而,也正是因为如此其失去了能源监管主体下的多能源交互主体共识方法的顺序功能,这将在高并发请求下可能导致能源区块链的分叉问题,本节采用回滚机制来解决分叉问题。

3 案例分析

为了验证基于PBFT算法的多能源交互主体共识方法的有效性与并发性能,本文采用Java程序设计语言设计实现一个实验模拟系统,利用一个线程模拟某个多能源主体,在单机中进行多个案例的实验测试。首先设计区块链网络中有4~50个多能源主体的测试案例,通过修改多能源主体的状态测试能源区块链网络下两种多能源交互主体共识方案的有效性并验证其容错性能。然后,以共识时间和共识吞吐量为指标,在区块链网络中分别增加多能源主体数量和请求并发数量来测试两种方案的并发性能。

3.1 容错性能测试案例

本文通过设计区块链网络中有4~50个多能源主体的测试实验来验证两种方案的容错性能,并以

区块链网络中有4个多能源主体为例,通过修改主体状态的多个测试案例来说明两种方案的有效性。

根据2.2节所述,两种多能源交互主体共识方案中涉及不同种类的消息格式类型,本文设置不同的数字代表对应的消息格式类型 T_{type} ,发送的消息内容用 D_{ata} 表示,不同的消息格式对应不同的消息内容,具体定义见附录A表A1。定义多能源主体之间发送信息的完整格式为 $\{T_{type}, D_{ata}, S\}$,其中请求分配序号 S 表示最后的共识结果。

1) 实验1

能源监管主体下:设置区块链网络中有4个多能源主体(A,B,C,D),其中定义A是初始能源监管主体,B,C,D是多能源主体。所有多能源主体均可正常工作,初始化通道A,仅允许多能源主体B发送请求消息,以A的执行过程为例可具体描述为:①A收到B发来的请求消息,完整格式为 $\{T_{type}=0, D_{ata}=B1, S=0\}$;②A在区块链网络中广播预准备消息,并为这条消息分配序号 $S=1$,完整格式为 $\{T_{type}=1, D_{ata}=B1, S=1\}$;③A收到来自B,C,D广播的准备消息,完整格式为 $\{T_{type}=2, D_{ata}=B1, S=1\}$;④A在区块链网络中广播确认消息,完整格式为 $\{T_{type}=3, D_{ata}=B1, S=1\}$;⑤A收到来自B,C,D广播的确认消息后,广播其回复消息,完整格式为 $\{T_{type}=4, D_{ata}=B1, S=1\}$,表明请求执行成功,执行结果 $S=1$ 。

能源对等主体下:设置区块链网络中有4个多能源主体(A,B,C,D),所有多能源主体均可正常工作,允许B发送请求消息,A,C,D执行过程相似。多能源主体B和以A为例的执行过程及结果,见附录A表A2和表A3。

2) 实验2

能源监管主体下:在实验1的基础上允许能源监管主体A和多能源主体B同时发送请求消息,则能源监管主体A和多能源主体B,C,D最后的执行结果如附录A表A4所示。

能源对等主体下:在实验1的基础上多能源主体A和B同时发送请求消息,其执行过程与实验1相同,执行结果 $\{T_{type}=4, D_{ata}=A1, S=2\}, \{T_{type}=4, D_{ata}=B2, S=3\}$ 。

3) 实验3

能源监管主体下:在实验2的基础上,使监管主体A宕机,多能源主体可正常工作,设置多能源主体B,C发送请求消息。而后监管主体A恢复状态,并设置多能源主体D节点发送请求消息。其余与之前设置相同。

所有主体在通道A上通信,监管主体A宕机。

此时多能源主体 B,C 发出请求消息,会收到请求主节点超时消息,则 B,C 会向区块链全网广播请求消息。B,C,D 收到该广播消息后首先转发给主节点 A,以确保 A 是否真的不能有效工作。而后,监管主体 A 恢复状态,这时多能源主体 D 发送请求消息。监管主体 A 收到多能源主体 D 的消息后为其分配序号并向全网广播此消息,A,B,C,D 执行结果如附录 A 表 A5 所示。

多能源主体 D 发送的请求消息执行成功之后,B,C,D 收到请求主节点超时消息,则会请求更换通道,完整格式为 $\{T_{\text{type}}=-2, D_{\text{ata}}=\text{Null}, S=0\}$,自动更换为 B 通道,即 B 为接下来的能源监管主体。B,C 请求重传数据,监管主体 B 为消息分配序号,执行结果见附录 A 表 A6。

4) 实验 4

能源监管主体下:在实验 3 的基础上使多能源主体 A,C 宕机,多能源主体 D 发送请求消息。监管主体 B 为其分配序号进入预准备状态,格式为 $\{T_{\text{type}}=1, D_{\text{ata}}=D2, S=7\}$,D 收到该消息后广播准备消息 $\{T_{\text{type}}=2, D_{\text{ata}}=D2, S=7\}$ 。由于多能源主体 A,C 宕机,准备消息迟迟等不到 A,C 的回复,B,D 均收到请求超时消息,表示此消息无法正常操作,自动舍弃。

能源对等主体下:在实验 2 的基础上使多能源主体 A,C 宕机,多能源主体 D 发送请求消息。多能源主体 B,D 的执行过程及结果见附录 A 表 A7 和表 A8。

5) 实验 5

能源监管主体下:在实验 4 的基础上,使多能源主体 B,C,D 成为不诚实主体,篡改 A 发送的请求消息。具体操作描述如下:①监管主体 B 收到自身发送的请求消息,完整格式为 $\{T_{\text{type}}=0, D_{\text{ata}}=B4, S=0\}$;②B 在区块链网络中广播预准备消息,并为这条消息分配序号 $S=7$,完整格式为 $\{T_{\text{type}}=1, D_{\text{ata}}=B4, S=7\}$;③A,C,D 篡改该消息内容为 $D_{\text{ata}}=B4^*$,并广播准备消息,格式为 $\{T_{\text{type}}=2, D_{\text{ata}}=B4^*, S=7\}$;④B 收到来自 A,C,D 广播的准备消息后验证不合法,超时自动丢弃;⑤A,C,D 在区块链网络中广播确认消息,完整格式为 $\{T_{\text{type}}=3, D_{\text{ata}}=B4^*, S=7\}$;⑥A,C,D 在区块链网络中广播回复消息,完整格式为 $\{T_{\text{type}}=4, D_{\text{ata}}=B4^*, S=7\}$,表明请求执行成功,执行结果 $S=7$ 。

多能源主体 B 发送的消息内容是 $D_{\text{ata}}=B4$,而最终并入的内容是 $D_{\text{ata}}=B4^*$ 。由此可见,区块链网络中存在 3 个不诚实主体的时候,数据容易被篡改,不能保证多能源交互主体间的有效共识。

能源对等主体下:在实验 4 的基础上,使多能源主体 A,C,D 成为不诚实主体,篡改 B 发送的请求消息。多能源主体以 A 为例和 B 的执行过程及结果见附录 A 表 A9 和表 A10。

本文通过实验 1、实验 2 和实验 3 证明了能源监管主体下的方案可保证交互主体达成有效共识,即使在初始监管主体宕机并恢复的情况下也可保证所有请求的一致性。通过实验 1 和实验 2 证明了能源对等主体下的方案可保证主体达成有效共识。即基于 PBFT 算法的多能源交互主体共识方法可保证主体达成有效共识。通过实验 3、实验 4 和实验 5 对比,可证明基于 PBFT 算法的多能源交互主体共识方法最多仅允许 1 个主体宕机或者不诚实。当区块链网络中有 2 个主体宕机或者不诚实时不能达成共识,也不能篡改消息。但当区块链网络中有 3 个主体不诚实时,消息极有可能被篡改。综上所述,两种方案在多能源主体间达成有效共识情况下,其容错性能相同。能源区块链网络中容错数量与多能源主体数量的关系如图 4 所示。

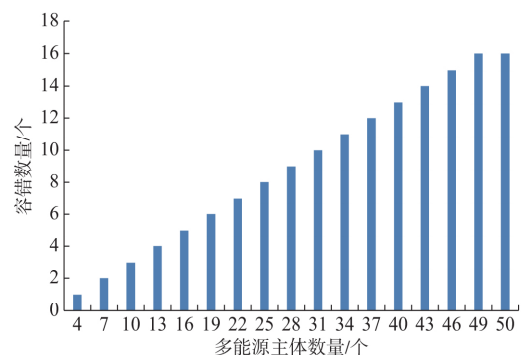


图 4 不同多能源主体数量下的容错数量
Fig.4 Number of fault tolerance with different number of multi-energy entities

3.2 并发性能测试案例

本文通过测试方法的共识时间和共识吞吐量来阐述两种方案的并发性能。一次共识时间是指一次请求的完成时间,共识吞吐量是指单位时间内达成共识的次数即可处理的请求数量。

本实验增加多能源主体和请求并发数目,设定所有多能源主体运行状态良好,不存在宕机现象,进行并发性能测试。设置不同多能源主体间消息传输时间为 $(10,60)\text{ms}$ 之间的随机数,多能源主体自身消息传输时间为 10ms 。

能源监管主体下:设置若多能源主体超过 $1\,000\text{s}$ 没有收到足够同类型消息,则投票无效。若多能源主体超过 $2\,000\text{s}$ 未收到监管主体的回应,则请求主节点超时。

能源对等主体下: 设置若多能源主体超过 1 000 s 没有收到足够同类型消息, 则该类型阶段 FALSE。

实验 6 在实验参数设置基础上, 分别选取多能源主体的数量为 4, 10, 18, 26, 34, 42, 50, 58, 64, 72, 80, 88, 92, 100 个, 进行不同多能源主体数量下处理单请求的平均共识时间测试, 能源监管主体下的方案中均有 3 个能源监管主体。每个共识时间数据均为 10 次实验数据的期望值(下同), 两种不同共识方案的测试结果如图 5 所示。

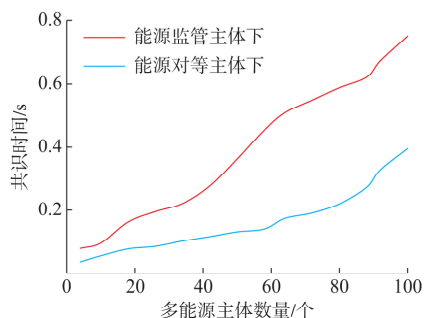


图 5 不同多能源主体数量下的共识时间
Fig.5 Consensus time with different number of multi-energy entities

由图 5 可以看出, 在处理单请求的情况下, 两种方案的多能源主体数量都与共识时间正相关, 即多能源主体数量越多, 共识时间越长。

实验 7 选取多能源主体的数量分别为 4, 10, 18, 34, 64, 88, 100 个, 对两种方案单位时间可达成共识次数进行统计, 结果如图 6 所示。

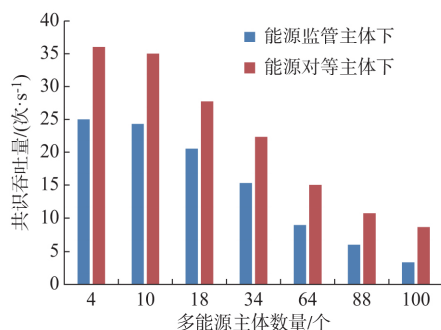


图 6 不同多能源主体数量下的共识吞吐量
Fig.6 Consensus throughput with different number of multi-energy entities

由图 6 可以看出, 在多能源主体数量分别以 4, 10, 18, 34, 64, 88, 100 增加时, 两种方案的共识吞吐量均逐渐降低, 且在相同的多能源主体数量下, 能源对等主体下的共识吞吐量始终高于能源监管主体下的共识吞吐量。对比图 5 数据可知, 两种方法同时处理多个并发请求的共识时间远小于处理单请求的共识时间。综上可知, 两种方法均具有较高的并发

性能, 且能源对等主体下的并发性能优于能源监管主体下的多能源主体交互共识。

然而随着多能源主体数量的逐渐增多, 两种方案的吞吐量逐渐变小, 尤其是多能源主体数量增加到 88~100 时。其原因是为多能源主体设置的处理请求超时时间不当, 当请求超时时需要重新处理请求, 影响了共识时间。多能源主体数量变多, 则每个主体需要等待的回复也就越多, 增加了共识时间。另外能源对等主体下的共识吞吐量始终高于能源监管主体下的共识吞吐量的原因也有能源对等主体下的方案无请求主节点为其分配序号的等待时间, 且无请求超时更换通道的等待时间。

两种多能源交互主体共识方案性能测试实验的各参数都是设定的, 在本实验设定的时间参数下, 固定多能源主体数量, 随着并发请求数量的增加, 处理每个请求的共识时间明显减小。由此可知, 设置合理的时间参数, 多能源交互主体共识方法可保证较高的并发性能, 且能源对等主体下的方案并发性能明显优于能源监管主体下的方案, 因此在微网、园区、电动汽车等可实现去中心化的场景中, 更倾向于选择能源对等主体下的多能源交互主体共识方案。

4 结语

本文提出一种基于 PBFT 算法的多能源交互主体共识方法, 以解决多能源系统协同优化中存在的难以鉴别多元数据真伪及多能源主体信誉等问题。方法通过能源区块链网络中的所有主体参与认证以达成最终共识来实现, 为防止交易被篡改, 保证交易的合法性、真实性、安全性和一致性, 难以避免会在一定程度上延长交易确认时间、降低交易效率等, 但这并不会从根本上影响系统运行, 而解决多能源主体不诚实和主体间互不信任的问题是实现多能源系统协同优化的重要基础, 这显然是可行且有必要。

本文的案例测试实验是在单机环境下, 采用模拟程序运行, 并不能完全真实反映实际网络与系统的共识时间以及共识吞吐量性能。下一步准备采用虚拟机与容器等技术建立实验环境, 进行更深入的对比测试实验。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 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): 4011-4023.
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): 4011-4023.
- [2] SHAO Changzheng, DING Yi, WANG Jianhui, et al. Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 361-370.
- [3] 丛昊, 王旭, 蒋传文, 等. 基于联盟博弈的综合能源系统优化运行方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 14-22. DOI: 10.7500/AEPS20170912006.
- CONG Hao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Coalition game based optimized operation method for integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 14-22. DOI: 10.7500/AEPS20170912006.
- [4] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24.
- WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.
- [5] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated electrical and gas network flexibility assessment in low-carbon multi-energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 718-731.
- [6] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7108-7120.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120.
- [7] 曹寅. 能源区块链与能源互联网[J]. 风能, 2016(5): 14-15.
- CAO Yin. Energy block chain and energy internet[J]. Wind Energy, 2016(5): 14-15.
- [8] 丁伟, 王国成, 许爱东, 等. 能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1-9.
- DING Wei, WANG Guocheng, XU Aidong, et al. Research on key technologies and information security issues of energy blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1-9.
- [9] 王安平, 范金刚, 郭艳来. 区块链在能源互联网中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(9): 1-6.
- WANG Anping, FAN Jingang, GUO Yanlai. Application of blockchain in energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(9): 1-6.
- [10] 北京大同区块链技术研究院. 基于区块链技术的智能微电网交易系统[EB/OL]. [2016-09-12]. <http://www.uni-ledger.com/micro-grid.html>.
- Beijing Datong Blockchain Technology Research Institute. Intelligent microgrid trading system based on blockchain technology[EB/OL]. [2016-09-12]. <http://www.uni-ledger.com/micro-grid.html>.
- [11] NGUYEN C. An indie, off-the-grid, blockchain-traded solar power market comes to Brooklyn[EB/OL]. [2016-03-18]. https://motherboard.vice.com/en_us/article/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar.
- [12] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
- OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [13] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
- TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638.
- [14] 平健, 陈思捷, 张宁, 等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3682-3690.
- PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [15] 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, 37(13): 3672-3681.
- ZENG Ming, CHENG Jun, WANG Yuqing, et al. Primarily research for multi module cooperative autonomous mode of Energy Internet under blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681.
- [16] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3667-3677.
- SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [17] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3829.
- SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3829.
- [18] 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.
- [19] 龚钢军, 王慧娟, 张桐, 等. 基于区块链的电力现货交易市场研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13 [2018-07-13]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172645.
- GONG Gangjun, WANG Huijuan, ZHANG Tong, et al. Research on electricity market about spot trading based on blockchain[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13 [2018-07-13]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172645.
- [20] LAMPORT L. The part-time parliament[J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1998, 6(2): 133-169.
- [21] ONGARO D, OUSTERHOUT J. In search of an understandable consensus algorithm[C]// 2014 USENIX Annual Technical Conference, June 19-20, 2014, Philadelphia, USA.
- [22] CASTRO M, LISKOV B. Practical Byzantine fault tolerance[C]// Proceedings of the Third Symposium on Operating Systems Design and Implementation, February, 1999, Berkeley, USA: 173-186.

- [23] 刘肖飞.基于动态授权的拜占庭容错共识算法的区块链性能改进研究[D].杭州:浙江大学,2017.

LIU Xiaofei. Research on blockchain performance improvement based on Byzantine fault tolerance consensus algorithm based on dynamic authorization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

- [24] REITER M K. A secure group membership protocol[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1996, 22(1): 31-42.

王德文(1973—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统自动化与智能信息处理。E-mail: wdewen@gmail.com

王莉鑫(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向:能源区块链共识机制。E-mail: 15076508926@163.com

(编辑 章黎)

Consensus Mechanism of Multi-energy Interactive Subject Based on Practical Byzantine Fault Tolerance Algorithm

WANG Dewen, WANG Lixin

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract : In order to make full use of renewable energy and achieve local consumption, multi-energy systems need to be closely integrated and coordinated to form an organic whole. The optimization objectives of multi-energy system on the energy supply side, the transmission side and the demand side are analyzed. It is pointed out that there are problems in the collaborative optimization of multi-energy system, i. e. , it is difficult to identify the authenticity of multi-data and the multi-energy subject reputation. A consensus method of multi-energy interactive subject based on practical Byzantine fault tolerance (PBFT) algorithm is proposed, which focuses on the energy blockchain network under the energy supervision subject and the energy peer so that the multi-energy subjects are dishonest and distrustful. In this case, an effective consensus can be reached. The design simulates a blockchain network composed of multiple energy entities. Experimental results show that the above method can ensure effective consensus among multiple energy subjects, and the average consensus time for multi-energy subjects to process single requests increases with the number of subjects. In addition, the test results of the consensus throughput show that the consensus throughput under the energy peer is greater than the consensus throughput under the energy regulator.

Key words : multi-energy system; collaborative optimization; practical Byzantine fault tolerance (PBFT); consensus mechanism; blockchain

(上接第 40 页 continued from page 40)

Optimal Dispatch of Integrated Electricity and Natural Gas System and Accommodation of High-penetration Wind Power Considering Dynamic Line Pack

CHEN Zexing¹, ZHAO Zhendong², ZHANG Yongjun¹, LIN Xiaoming¹, CHEN Boda¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Green Energy Technology, School of Electric Power,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Electrical Technology Co. Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract : This paper focuses on the study of optimized dispatching for integrated electricity and natural gas system (IEGS) under the background of high-penetration wind power. Firstly, the scale factor for wind power integration is proposed. This scale factor is introduced into the random model of wind power as a control variable so that wind power modeling can reflect the correlation between the degree of wind power and its grid-connected power. Then, based on the dynamic line pack model and flow balance equation of natural gas transmission, the mechanism of buffer characteristics exhibited by natural gas system is derived. Furthermore, taking the minimum purchased energy cost of IEGS as the target, taking into account the dynamic characteristics of the natural gas network, and introducing the optimization method of the limit scene, the economic dispatching model of IEGS with high-penetration wind power is established, and the model is linearized for solution. Finally, the simulation system is built to verify the mitigation effect of the line pack on wind power uncertainty, which can effectively improve the flexibility of system operation. In addition, it is concluded that the application of power to gas (P2G) is conducive to improving the wind power accommodation capability, but this capability is limited by the uncertainty degree of wind power.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777077) and Guangdong Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2017A030313304).

Key words : line pack; high-penetration wind power; integrated electricity and natural gas system (IEGS); power to gas (P2G); optimal dispatch

附录 A

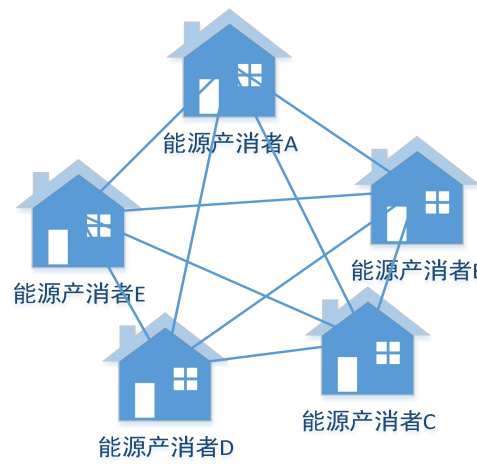


图 A1 能源对等主体下的能源区块链网络结构
Fig.A1 Energy blockchain network structure under energy peers

表 A1 消息类型设置
Table A1 Message type setting

Type	Num	Data
请求更换通道	-2	Null
请求通道	-1	Null
请求发送数据	0	Data
预准备	1	Data
准备	2	Data
确认	3	Data
回复	4	Data

表 A2 主体 B 的执行过程
Table A2 The execution process of subject B

共识过程	主体收到的信息	主体的操作
Prepare	收到来自 A,C,D 的 Prepare 信息	Commit 状态为 TRUE
Commit	收到来自 A,C,D 的 Commit 信息，已经 Commit 数量为 4	{Type=4,Data=B1, S=1}

表 A3 主体 A 的执行过程
Table A3 The execution process of subject A

共识过程	主体收到的信息	主体的操作
--	收到 B 的 Pre-prepare 信息	Prepare 状态为 TRUE
Prepare	收到来自 B,C,D 的 Prepare 信息	Commit 状态为 TRUE
Commit	收到来自 B,C,D 的 Commit 信息，已经 Commit 数量为 4	{Type=4,Data=B1, S=1}

表 A4 B,C 发送请求消息的执行结果
Table A4 Request message execution result from B,C

多能源主体	通道	执行结果		
		Type	Data	S
A	A	4	A1	2
		4	B2	3
B	A	4	A1	2
		4	B2	3
C	A	4	A1	2
		4	B2	3
D	A	4	A1	2
		4	B2	3

表 A5 D 发送请求消息的执行结果
Table A5 Request message execution result from D

多能源主体	通道	执行结果		
		Type	Data	S
A	A	4	D1	4
B	A	4	D1	4
C	A	4	D1	4
D	A	4	D1	4

表 A6 B,C 发送请求消息的执行结果
Table A6 Request message execution result from B,C

多能源主体	通道	执行结果		
		Type	Data	S
A	B	4	B3	5
		4	C1	6
B	B	4	B3	5
		4	C1	6
C	B	4	B3	5
		4	C1	6
D	B	4	B3	5
		4	C1	6

表 A7 主体 B 的执行过程
Table A7 The execution process of subject B

共识过程	主体收到的信息	主体的操作
--	收到 D 的 Pre-prepare 信息	Prepare 状态为 TRUE
Prepare	收到来自 D 的 Prepare 信息, Prepare 数量为 2	Commit 状态为 FALSE
--	请求超时	请求执行失败

表 A8 主体 D 的执行过程
Table A8 The execution process of subject D

共识过程	主体收到的信息	主体的操作
Prepare	收到来自 B 的 Prepare 信息, Prepare 数量为 2	Commit 状态为 FALSE
--	请求超时	请求执行失败

表 A9 主体 A 的执行过程
Table A9 The execution process of subject A

共识过程	主体收到的信息	主体的操作
--	收到 B 的 Pre-prepare 信息	篡改 Data=B3*, Prepare 状态为 TRUE
Prepare	收到来自 C,D 的 Prepare 信息	Commit 状态为 TRUE
Commit	收到来自 C,D 的 Commit 信息, 已经 Commit 数量为 3	{Type=4,Data=B3*, S=4}

表 A10 主体 B 的执行过程
Table A10 The execution process of subject B

共识过程	主体收到的信息	主体的操作
Prepare	收到来自 A,C,D 的 Prepare 信息,验证未通过	Commit 状态为 FALSE
--	请求超时	请求执行失败, 更新得 {Type=4,Data=B3*, S=4}