

**研究生学位论文开题报告**

**报告题目 无线网络中区块链共识算法的研究**

**学生姓名 张利 学号 201818020629027**

**指导教师 姚郑/张宝贤 职称 教授**

**学位类别 工学博士**

**学科专业 计算机应用技术**

**研究方向 区块链共识算法**

**培养单位 人工智能学院**

**填表日期 2021-9-1**

**中国科学院大学制**

**填 表 说 明**

1. 本表内容须真实、完整、准确。
2. “学位类别”名称填写：哲学博士、教育学博士、理学博士、工学博士、农学博士、医学博士、管理学博士，哲学硕士、经济学硕士、法学硕士、教育学硕士、文学硕士、理学硕士、工学硕士、农学硕士、医学硕士、管理学硕士等。
3. “学科专业”名称填写： “二级学科”全称。

目录

[1选题的背景及意义 4](#_Toc93415122)

[2国内外本学科领域的发展现状与趋势 5](#_Toc93415123)

[2.1 单一主链区块链共识算法 5](#_Toc93415124)

[2.1.1 基于工作量证明共识算法 6](#_Toc93415125)

[2.1.2 基于权益证明的共识算法 7](#_Toc93415126)

[2.1.3单一委员会混合共识算法 7](#_Toc93415127)

[2.1.4多委员会混合共识算法 8](#_Toc93415128)

[2.1.5其他共识算法 10](#_Toc93415129)

[2.2 DAG区块链共识算法 10](#_Toc93415130)

[2.2.1 Tangle共识算法 11](#_Toc93415131)

[2.2.2 基于见证人的共识算法 11](#_Toc93415132)

[2.2.3 基于DPoS的共识算法 12](#_Toc93415133)

[2.2.4基于虚拟投票的共识算法 12](#_Toc93415134)

[3课题主要研究内容、预期目标 13](#_Toc93415135)

[4拟采用的研究方法、技术路线、实验方案及其可行性分析 14](#_Toc93415136)

[4.1技术路线方案 14](#_Toc93415137)

[4.1.1基于节点稳定度的无线区块链网络共识算法 14](#_Toc93415138)

[4.1.2基于稳定性的PBFT无线区块链网络共识算法 16](#_Toc93415139)

[4.1.3基于稳定度的分片PBFT区块链共识算法 17](#_Toc93415140)

[4.1.4基于稳定度的DAG区块链共识算法 19](#_Toc93415141)

[4.2可行性分析 21](#_Toc93415142)

[5研究工作计划与进度安排 21](#_Toc93415143)

[参考文献： 22](#_Toc93415144)

# 1选题的背景及意义

随着互联网的蓬勃发展，多方协作的安全性和可信性要求越来越高。随着多方协作的规模越来越大，传统的第三方信任机构会伴随着较高的人为决策风险和成本。因此中心化机构已经无法满足大规模协作的需求，区块链技术作为新的信用体系应运而生。

自2008年中本聪[1]提出比特币后，其底层技术—区块链技术受到了工业和学术领域的高度关注。区块链本质上是一个去中心化的数据库，结合了P2P网络、分布式数据库、共识算法、非对称加密等多种技术。区块链应用的P2P网络中各节点的计算机地位平等，每个节点有相同的网络权力，不存在中心化的服务器。所有节点间通过特定的软件协议共享部分计算资源、软件或者信息内容。区块链主要是解决信任和安全问题，提供了一种在不可信场景中安全可靠地进行信息与价值传递交换的协作模式。区块链大致经历了三个发展阶段：分为区块链1.0、区块链2.0和区块链3.0时代。区块链1.0时代，区块链技术主要是作为数字货币的底层支撑技术。在这个时期,区块链技术的发展与数字货币密切相关,应用普遍集中在货币转移、兑换和支付等方面。随后区块链2.0时代主要是解决市场的去中心化，这个时期的发展与合约技术的发展密切相关。V.Buterin[2]首次提出实现智能合约编写的以太坊区块链平台，将智能合约和区块链技术结合使得区块链技术得以提升。区块链为智能合约提供可信执行环境,而智能合约便于区块链扩展应用。随着时间的推移,这项技术的应用超越了货币,延伸至更广阔的领域,并具备了更大的兼容性。区块链3.0时代也是区块链全面应用的时代,由此构建一个大规模协作社会。除金融、经济等方面,此时的区块链在社会生活中的应用更为广泛,特别是在政府、健康、科学、文化和艺术等领域。区块链技术无论是在构建价值自由流通的互联网，还是在企业基于建立联合多中心的数据共享方面，都有着广阔的应用前景。

随着5G和物联网的普及，在无线节点之间管理设备、共享消息和执行计算任务等面临的问题越来越多，在具有小世界和超密集特征的无线网络中，安全和信任问题甚至变得难以处理。无线网络是无线通信技术和网络技术相结合的产物。1971年，第一个无线电通讯网络—ALOHNET由诺曼·艾布拉姆森（Norman Manuel Abramson）和他的团队在夏威夷大学构造出。无线网络具有高灵活性、便捷性、易于网络规划和调整、故障定位容易以及易于扩展等优点。但是无线网络面临着严重的网络安全问题，包括女巫攻击、无线信道劫持攻击、日蚀攻击、窃取网络资源等，这些都会对建立在无线网络上的应用产生致命伤害。区块链的安全可信任特性可以为无线网络的应用提供安全和信任保障。如果将无线网络应用中数据的上传和在应用中的操作都当作区块链交易来处理，则可以在传输层面保护数据和通信安全。区块链可以将设备映射为公私密钥，数据的上传视为由智能合约验证的交易事务，区块链使用非常先进的加密技术来确保事务信息被锁定在区块链中，安全性相比不使用区块链技术的无线网络应用得到了很大的加强。

区块链技术可以有效的解决建立在无线网络上的应用中的安全信任问题，确保数据的安全性、可信性和完整性，但是区块链技术应用于无线网络场景还面临着一些挑战。一方面，区块链的区块链系统的性能很大程度上是受到共识算法的限制的。目前主流的区块链共识算法主要有PoW共识算法,PoS共识算法以及PBFT共识算法等。这些共识算算法具有能耗巨大，效率低，依赖代币，网络通信复杂度高等缺点。另一方面，无线网络可用资源的波动性和移动终端设备可用资源的有限性，无法满足目前需要耗费大量计算资源以及需要稳定的网络传输数据的区块链系统的需求。因此，亟需根据无线网络的特性设计高效节能的区块链共识算法，使得引入区块链技术的无线网络应用具有很好的扩展性和安全性。

# 2国内外本学科领域的发展现状与趋势

共识算法是区块链技术的基础和核心，影响着区块链系统的可扩展性和安全性。在设计区块链共识算法时需要重点考虑系统模型和共识过程。系统模型包括网络模型、（同步、部分同步、异步）、节点模型（动态节点、静态节点）、故障模型（拜占庭故障、非拜占庭故障）、网络可用资源（功率、信道、存储资源等）；共识过程则包括共识节点的选择、交易排序、验证和区块上链。通过考虑不同的应用场景，为了降低共识延迟、提高系统交易吞吐量，学术界和工业界对区块链共识算法开展了大量的研究。下面将阐述与本报告研究内容相关的典型工作：单一主链区块链共识算法和DAG区块链共识算法。

## 2.1 单一主链区块链共识算法

在区块链系统中，大致可以将共识算法分为：基于工作量证明共识算法、基于股份证明的共识算法、委员会共识算法（单一委员会混合共识算法、多委员会混合共识算法）以及其他共识算法。

### 2.1.1 基于工作量证明共识算法

工作量证明最早C.Dwork和M.Naor[3]在1992年提出，用来解决垃圾邮件问题.该机制要求邮件在被发送之前必须完成某个数学难题的答案来证明确实执行了一定量的工作。A.Back在1997年提出,并在2002年正式发表的Hashcash [4]通过寻找哈希函数原像实现工作量证明。在1999年，M.Jakobsso[5]正式提出了工作量证明的概念。这些工作都为比特币的共识机制奠定了坚实的基础。在区块链技术中，工作量证明主要用来防止敌手制造假身份发动女巫攻击。基于工作量证明共识算法中，所有参与共识的节点都可以通过消耗计算算力解决一个数学难题证明自己完成了一部分工作，从而获得生成区块的权限，出块成功后可以获得系统的奖励以及区块中所有交易费用。

为了解决交易无第三方的信任问题，中本聪[1]采用工作量证明的共识算法为电子货币的交易达成安全共识。用户通过使用算力进行哈希计算来证明自己生成区块的合法性，并通过一个链式结构来确保达成共识的账本不可篡改，保证了账本的安全性。采用工作量证明的共识算法面临着面临着安全性和敌手攻击的威胁。一些研究者针对比特币的安全性进入深入研究。J.Garay等人[6]提取和分析了比特币协议的核心，针对区块链的共同前缀、链质量和链增长特性，证明了在满足哈希算力和同步网络下区块链的安全性，为加密货币的共识算法提供了首个“可证明安全”模式。R.Pass等人[7]在此基础上进一步分析了区块链在部分同步的网络环境下区块链的安全性。基于工作量证明的共识算法也存在被敌手攻击的可能性，常见的有日蚀攻击[10]、双花攻击以及自私挖矿攻击[11,12]等。I.Eya[12]通过分析比特币系统中自私挖矿的成功概率，最终证明敌手可以通过控制全网的小部分算力攻击系统成功。此外，基于工作量证明的机制面临着交易吞吐量低、交易确认延时长的性能问题。I.Eyal等人[8]提出的Bitcoin-NG也是一种基于工作量证明的共识算法，意在提升比特币处理交易的能力。Bitcoin-NG中引入关键块和微块，使得系统能够在增加交易区块频率、提升交易吞吐率的同时, 保证协议的安全性和公平性。这个共识算法将交易区块与出块者选举的过程分离开来, 体现了协议设计的模块化思想。为了解决比特币中中矿工利用专用集成电路ASCI挖矿而导致的算力中心化和挖矿资源集中化的问题，以太坊[2]设计抵抗ASIC且支持轻量级客户端快速验证的工作量证明算法Ethash缓解挖矿中心化的问题，并且在确保系统安全性的时候提升交易吞吐量降低交易确认延时。除了在电子加密货币上的应用，区块链也可以作为智能合约的底层技术。以太坊作为能够运行智能合约的公共区块链平台，允许双方在没有可信第三方的情况下实现可信交易。由于出块时间短，以太坊出现分叉时算力小的矿池或节点的分支将被裁减。以太坊引入叔块机制使得分叉区块也会被后出现的区块引用，从而解决了低算力矿池和节点缺乏分支竞争力的问题。为了解决比特币区块链系统中由于自私挖矿攻击导致的诚实用户链质量的下降的公平性问题，R.Pass和E.Shi[9]提出了FruitChains，其中水果的产生也是通过寻找工作量证明来完成, FruitChains中水果和区块的挖矿同时运行,且利用同一个哈希函数完成，只是水果的挖矿难度会远低于区块的挖矿难度。由于需要确保水果的新鲜度，因此自私挖矿生成的区块和水果不会被诚实矿工接受。最终几个区块和水果的奖励会平均奖励给所属节点。在FruitChains中,节点不再需要参与矿池就能频繁获得挖矿收益, 降低了矿池带来的算力集中化。

### 2.1.2 基于权益证明的共识算法

基于权益证明的共识算法主要了为了解决工作量证明中能源消耗巨大的问题。基于权益证明的共识算法中节点或用户根据拥有资产的比例来决定成为下一个出块者的概率。节点生成区块不需要消耗大量的计算算力。

由S.King和S.Nadal[13]提出的点点币首次引入了权益证明的概念。首先通过一定阶段的PoW生产出一定数量的代币，随后根据代币的币龄选择出块的节点。节点代币越多、持币时间越长则获取出块权限的概率则越大。这类区块链共识算法可以快速生成区块，因此具有较大的交易吞吐量和较低的交易确认延时。但是，基于权益的共识算法面临着节点长期离线和敌手攻击的威胁，主要有无利害关系攻击[21]、打磨攻击[22]、长程攻击[23]、权益窃取攻击[24]等。针对系统达成一致性效率低以及无利益攻击的问题，委托权益证明(delegated proof of stake, DPoS)[20]采用委托人的形式,权益持有者投票给信任的委托人,票数与其权益大小成比例关系,最终选出101名委托人以平等的权利轮流作为区块生产者行使权利。如果委托人在委任期间未按规则产生正确区块, 该委托人将会被除名,所有权益持有者选出新的超级节点将其替代。DPoS以选举委托人的形式实现共识,但是带来了严重的中心化问题。对于PoS共识算法中的无利害关系的问题，V.Buterin等人[14]提出的Casper FFG是以太坊的PoS共识机制。其中区块产生仍然依靠以太坊的Ethash工作量证明算法,但是每隔50个区块出现一个检查点,验证者通过PoS的方式来对检查点完成最终确定。验证者需要将持有的以太币质押到系统的智能合约中，节点被选中的概率与其质押的以太币成正比。验证者通过投票完成预确认和最终确认两轮验证，最终最确认的检查点作为合法的当前状态，可以被新加入的节点成功获取。检查点机制解决了PoS共识算法中的长程攻击。对于PoS共识算法中节点长期离线的问题，Casper FFG采用惩罚机制使得节点有长期保持在线的理由，从而确保安全性。由A.Kiayias等人[15]提出的Ouroboros,利用形式化的方法建立了PoS共识机制的模型,并证明了Ouroboros 能够满足安全性。该共识算法将事件分为多个时期，每个时期分为多轮，每轮最多产生一个区块，如果出块节点不在线则在这一轮不产生区块。在每个时期开始，系统根据节点所持有的股份选出这个时期的出块候选人，并且随机的选举出下一个出块人。Ouroboros 通过随机安全多方计算协议确保在存在敌手的情况下产生抗偏置的随机数。通过选出的多个背书节点对交易进行验证并打包给出块者。这些机制都可以提高共识算法的抗无利益攻击性。通过将多个区块的交易非放入交易池，并根据参与节点的贡献度按比例分配给相应节点，Ouroboros鼓励权益持有者保持在线解决节点离线问题。B.David 等人[16]提出的Ouroboros Praos改进了Ouroboros 中出块者的选举方式。节点私下确定是否被选为出块者，节点之间不能提前判断其他节点是否被选中,，直到出块者成功将区块生成，这样有效防止了敌手可能对出块者发起的贿赂攻击或 DDoS 攻击。~~随后，C.Ganesh等人[17]改进了Ouroboros Praos，加入了隐私保护，并且提出了匿名可验证随机函数的概念。~~ Badertscher 等人 [18] 提出了Ouroboros Genesis,详细设计了新节点加入网络时的自启(bootstrap)过程,解决了PoS共识机制存在的长程攻击。该共识算法中新加入的节点通过从不同的节点获得多个链做对比来最终确定与其他链的共同前缀且是最长链。Ouroboros Genesis在没有采用检查点机制的前提下能够抵抗长程攻击,并且在通用可组合 (universally composability) 模型下, 形式化证明了协议的安全性。由 P.Daian等人[19]提出的Snow White是使用PoS的可重配置共识算法,重配置的间隔时间短暂,能够满足节点随机加入和退出网络的需求。重配置过程选出系统中最近的权益拥有者作为候选出块者集合,然后按集合中成员权益占比随机选择出块者。Snow White中出块候选者集合随着系统中权益的变化而重新选择,防止敌手的后来腐化 (posterior corruption) 攻击。在Snow white中允许节点间接参与共识，通过将几个区块的奖励和交易费用平均分给出块者确保了节点参与共识的活性和公平性。

### 2.1.3单一委员会混合共识算法

混合共识算法的含义是将经典分布式共识算法与区块链共识算法相结合，即采用PoW或PoS的方式选举特定的委员会，在委员会内部运行经典分布式共识算法生成区块。混合委员会共识算法又分为单一委员会共识算法和多委员会共识算法。采用单一委员会的混合共识算法选举一个委员会负责全网所有交易的处理， 而采用多委员会的混合共识共识算法将选举多个并行运作的委员会，将全网划分为多个片区，分片处理网络中的交易。混合共识算法的一般流程是：选举委员会成员、选举委员会首领、执行委员会内一致性算法、广播区块、更换委员会视图。

混合共识算法需要解决在不依赖可信启动来初始化委员会配置的问题，在委员会重置时需要解决委员会中诚实成员达到一定比例问题，委员会成员交替时交易的处理问题，敌手影响委员会成员加入委员会的问题。新节点加入时时需要解决节点快速安全的自启问题，节点获取交易信息真实有效以及识别虚假信息问题。委员会一致性算法的执行需要解决客户端提交交易快速响应问题，提高委员会内一致性算法运行效率问题，降低委员会通信复杂度和计算复杂度问题，以及并行提议实现问题。

C.Decker等人[25]提出的PeerCensus首次将经典分布式一致性算法PBFT 与PoW共识算法结合，利用比特币作为底层链，选出一定数量的节点完成身份认证后，通过PBFT来实现链一致算法完成最终区块的生成。该算法能够抵抗女巫攻击，并且能够达成强一致性共识。由于节点的进入和离开都需要委员会成员达成共识，恶意用户会利用PeerCensus的离开检测机制通过不断制造离开提议的方式降低整个系统的运行效率。由E.Kokoris-Kogias等人[26]提出的ByzCoin同样是将PoW与PBFT相结合的共识算法。该共识算法采用Bitcoin-NG的思想生成区块，通过找到最近的144或1008个关键区块的节点进入委员会，节点的投票权由关键块的比例决定。委员会采用群体签名的方式利用默克尔树结构对每个消息的节点签名排列。对微块达成共识。委员会成员采用滑动窗口的方式重置委员会确保委员会中成员不会快速变化。但是这个机制没有解决初始委员会配置的问题。相较于PeerCensus共识算法，该算法中节点的进出不用委员会成员协商，提高了效率。为了解决了委员会重配置时可能出现的问题，I.Abraham等人[27]提出的Solida共识算法。该算法采用Paxos思想，首先为每个领导者赋予不同等级，新节点加入委员会重配置进入委员会之后等级增加，并成为新的领导。当节点找到一个PoW时，该节点的生存时期增加，并成为领导。当一个节点长期成为领导时，在委员会中选出新的领导更换视图。Solida共识算法委员重配置是利用PoW机制，一旦出现新领导，当前领导任期被打断，经过委员会共识之后，新领导接管委员会，并且对之前大段的提案重新发起共识。为了防止自私挖矿带来链质量的下降，Solida在PoW中嵌入了新鲜的随机数，将每一轮提议最终得到的多个签名嵌入到 PoW 中，保证诚实用户的链质量。为了解决交易的响应速度慢的问题，R.Pass和E.Shi[28] 提出Hybrid consensus将PoW与非授权的BFT算法结合的混合共识机制,实现非授权环境中的状态机复制。Hybrid consensus 共识算法首先利用Snailchain选出一个初始静态委员会，诚实节点会根据其局部链去掉尾部中不稳定的个区块，并选择前个区块的出块者作为BFT委员会。为了解决自适应腐败攻击，采用轮换委员会成员的方式。当诚实节点的链达到长度时第R个委员会成员也是去掉尾部k个不稳定区块，选择最后个区块的出块者成为委员会成员。这使得敌手无法干扰委员会成员的选择。第个委员运行BFT协议来提交交易直到收到停止命令。因此委员会成员会逐渐输出已提交的交易。提交的交易会被记录在每日日志中。同时，该算法首次利用形式化的安全模型和模块化的设计建模混合共识机制，并证明了其能够满足一致性和活性等安全特性。由Y.Gilad等人[29]提出的Algorand是将PoS与经典分布式一致性算法结合的混合共识算法。Algorand共识算法首先根据上一轮的区块信息计算本轮的随机数，节点根据随机数判断自己是否被选中。设置两个不同的值判定自己是否选中成为首领或委员会成员。委员会成员内部执行新的双层共识的拜占庭一致性算法⋆ 来解决敌手腐蚀问题。每一轮投票都采用新的委员会使得委员会成员在达成共识之前不会被敌手腐蚀。新一轮投票的成员是利用PoS 共识算法在所有权益持有者中随机选择一定数量的委员会成员, 相比于 PoW，PoS选择成员的方式更加快速、高效, 因此可以被 Algorand 用于委员会的快速更新。Algrand具有较高的交易吞吐量和扩展性，可用于规模较大的应用场景。单委员会混合共识算法将经典分布式一致性算法与非授权共识相结合, 具有强一致性特性,区块链分叉概率很小,交易能够得到较快速度的确认.

### 2.1.4多委员会混合共识算法

为了解决区块链处理交易的可扩展性,利用多个并行的委员会来处理网络中不同分片的交易的混合共识算法被提出，也被称为分片共识算法。目前的分片分为通信分片、计算分片以及存储分片。通信分片将全网分为不同的片区，每个片区由一个对应的委员会处理。每个委员会内部成员大部分时间只需内部通信，每个分片内部的其他节点可以通过与该分片内委员会通信获得目前区块链的状态。计算分片时每个分片委员会只负责处理其对应的交易，对交易运行委员会内一致性算法,验证该交易的合法性,最终决定该交易是否被添加到区块链中。计算分片使不同的交易以并行的形式被不同的委员会处理,当网络中节点数量增多时, 可以增加更多的委员会,这样交易处理性能随着网络中节点数量的增多而增加, 进而实现了交易处理的可扩展性。存储分片在不同分片委员会将处理后的交易分片存储,每个分片委员会只负责处理本分片对应的交易,将交易放到本分片专属的交易区块链上。存储分片将整个区块链系统的交易数据或未花费的交易输出数据分片存储,降低了节点的存储负担。如果采用存储分片,那么可能每个分片各自生成和广播其区块链,不存在全局的区块链。分片共识在实现交易处理可扩展性的同时, 引入了一些新安全性问题的问题。跨片交易需要多个分片共同协作安全和高效地处理。在过程中需要解决双花攻击、重放攻击[37]和交易锁死等问题,并且需要一定的方式提升交易的处理速度。在运行委员会内一致性算法步骤中,当一个交易包含多个输入且其属于不同分片时,需要多个分片协作完成对该交易的处理, 防止交易双花攻击。分片共识中,当不要求每个分片委员会数目相同时,当两个委员会之间交流过于频繁时,可以考虑将其合并为一个委员会,提高交易处理速度等。同时需要解决新加入成员分配到不同委员会的过程受到敌手的偏置的问题,避免委员会冲恶意成员个数超过限制使得敌手可能控制委员会。因此,为了防止敌手在此过程中影响成员分配,需要设置合理的分配策略。针对委员会中的恶意行为是很难发现的，因此需要解决快速检测恶意委员并迅速恢复或者重置委员会的问题。

L.Luu等人[30]提出ELASTICO将参与共识的节点分为多组。在一轮共识中，每组委员会会输出一个区块，最终通过最终共识委员会整合输出一个总区块。ELASTICO并行处理交易的方式提升了区块链系统的性能。该算法通过工作量证明和随机数的方式选择出一个时期内的共识节点，从而避免女巫攻击。通过目录委员会机制来为多个委员会分配成员，委员会内部都运行PBFT一致性算法，每个分片委员将其内部共识结果附上签名发送给最终委员会，最终委员会内部也运行PBFT一致性协议对最终总区块达成共识。最终委员会通过随机数生成协议为下一轮的共识节点的选择增加可验证性。针对ELASTICO 分片共识中容错率低、抗偏置性低以及无法跨片交易的问题，E.Kokoris-Kogias等人[31]提出的Omniledger。该共识算法采用UTXO模型，网络中不同分片的节点只需处理和存储该分片对应的UTXO数据。同时，该算法提出了跨片交易防锁死的解决方案。该算法中有两种区块链：身份区块链和交易区块链。节点想要参加一轮共识则需要在上一轮中通过工作量证明完成身份注册。上一轮的委员会通过执行内部一致性算法将身份信息加入到身份区块链上。随后在新的一轮中，通过密码学抽签的方式确定首领，并通过RoundHound算法生成本轮随机数作为随即置换函数的种子对委员会成员进行分片。委员会内执行一致性算法处理分片内部的交易。对于委员会重置问题，Omniledger设置合理的挖矿难度来部分提婚委员会中的节点，被替换节点采用本轮随机数来进行选择。这样可以提高系统容错率和抗偏置性。针对跨分片的交易，Omniledger利用原子性跨片交易防止跨片交易锁死。针对交易输入在多个分片中的情况，每个分片的首领会先验证交易的输入是否在自己的分片中。若是则该分片领导提供旧交易输入在本分片UTXO中的默克尔书路径（接收证明），并将该交易锁定；否则就拒绝。若交易的输入所有分片都提供了接受证明，则该交易被提交交易和所有的输入证明。输出分片收到交易之后，验证所有交易的合法性后将输出交易放入输出分片的下个区块中。若交易输入分片中有拒绝的情况，则该交易将被取消，所有输入分片领导者也会收到取消信息，将锁定的交易解锁为可用状态。这个方案解决了跨分片交易的问题。为了更好的防止敌手使得委员会选举出现偏置问题，文献[32]对Omniledger使用的随机数生成算法改进,采用公开可验证秘密分享，确保了随机数的不可预测性、抗偏置性和公开可验证性,并且保证了随机数的持续生成。分片共识算法除了应用在电子加密货币上，也可以扩展到智能合约应用上。由M.Al-Bassam等人[33]提出的Chainspace在分片的基础上,构建了智能合约应用平台。Chainspace通过将智能合约的执行和验证分离，提出跨片交易处理的原子提交协议（BFT协议和原子提交协议）解决交易和智能合约跨片处理的问题。Chainspace实现了交易和智能合约的通信分片和计算分片，在确保其安全性的同时提供较高的交易吞吐量。针对节点存储有限的问题，M.Zamani等人[34]提出的RapidChain很好实现了计算分片、通信分片 和存储分片,大大的提高了性能。共识算法主要包括启动 (bootstrap)、共识和重配置。对于初始委员的选举和创世块的生成RapidChain采用随机图的方式选出根群组，随后利用根群组运行分布式随机数生成协议生成目录委员会，随后目录委员会再负责生成其他的分片委员会。该共识算法分时期运行，每个时期又分为多个轮，每一轮中，委员会内部采用使用同步拜占庭容错协议。对于每个时期委员会重置，为了防止自私挖矿攻击，节点通过加入随机数的工作量证明加入委员会。系统采用有界布谷鸟规则尽量确保新节点替换掉委员会中不活跃的旧节点。该共识算法在网络层中采用消息扩散算法能够将区块传播速度提升。RapidChain 对于跨分片交易采用将交易拆分的方式，并再对应交易所属的分片中达成共识，最终根据共识结果分片存储。这个方法实现了分片通信、分片计算和分片存储。由于每个时期中委员会内部的共识采用的是同步网络模型，这将导致交易确认不能满足快速响应的特性。~~I.Manuskin等人[35]提出的Ostraka采用了节点差异化环境模型,即认为每个节点处理交易的能力是不同的。在Ostraka中,每个节点处理所有的交易。Ostraka能够抵抗拒绝服务攻击,交易处理能力随网络规模的扩大而线性增加。H.Dang等人[36]采用数据库分片的方式来实现区块链的可扩展性,并利用可信硬件Intel SGX产生的可信随机数将节点分配到不同分片中, 确保了整个协议的活性和安全性。~~

### 2.1.5其他共识算法

除了通过消耗算力来做工作量证明降低节点女巫攻击成功的概率，一些人也研究了根据参与者能够使用的硬盘空间大小作为标准,选出区块的生产者的容量证明共识算法。A.Miller等人[38]提出了Permacoin的文件存储证明共识算法。该共识算法要求参与者有能力存储大文件的一部分。通过一个挑战应答机制来确定节点是否存储了文件部分。如果应答成功，则该节点成功获得奖励。节点最保险的方式是存储整个文件，从而就会确保挑战成功的概率，但是这个会耗费大量的存储资源，因此节点不可以通过伪造身份来获益，具有抗女巫攻击性。此外，S.Park等人[39]提出Spacecoin,采用非交互式空间证明(proof of space)达成共识。节点通过一次性付出的硬盘空间来获的出块权限。为了防止硬盘空间造假，节点出自加入网络的时候根据选择的存储空间大小，存储一部分具有特定序列的数据（存储的数据由用户的公钥决定，因此各用户的数据并不相同）。这些数据以有向无环图的结构存储，而每个数据块之间的关联关系，以Merkle树的形式发送给校验节点。校验人可由公钥知道证明人存储的是哪些数据、由发送的Merkle树知道这些数据以怎样的结构存储。校验节点验证时想证明者发送一个挑战，证明节点根据挑战信息生成对应数据的哈希值给校验节点。校验节点根据返回的值判定证明者是否硬盘空间造假。可以通过多次验证的方式来避免证明人的作弊行为。这个校验节点存储空间的方法在原来的文件存储证明的机制上加入了随机性，使得节点共识过程更具有公平性。但是存在无利益攻击、长程攻击和双花攻击的风险。消逝时间证明[40]是基于硬件芯片执行某个命令的等待时间来实现的,其实质是利用可信硬件产生随机数来决定下一个区块生产者。参与者在发布块之前都需要向Intel SGX中的飞地获取一个随机的等待时间,等待时间最短的节点被选为领导节点。这个算法可以提高交易吞吐量，减少能耗，并且具有很好的随机性，但是需要可信硬件的辅助，一旦硬件出现问题，则共识过程将不再可信。针对PoW共识算法能耗高，性能低的问题，D.Schwartz等人[41]提出了Ripple共识算法，通过信任节点列表分别对交易和区块达成共识。在确保交易安全性的前提下提高性能。目前的交易确认时间只需要4s，吞吐量可高达1500TPS。但是这类共识算法的容错率比较低。~~随后B.Chase等人[42]提出了一种新型的原子广播算法—Cobalt，在共识信任节点列表中提供更大的灵活性。~~

## 2.2 DAG区块链共识算法

单一主链的区块链系统的交易吞吐量的提升是非常有限的，这类区块链容易出现链分叉从而影响系统的安全性和扩展性。为了提高区块链吞吐量，新的链存储结构—有向无环图（DAG）应运而生。DAG区块链中的每个单元代表用户发起的一笔交易, 每一条从子单元指向父单元的有向边代表一种验证关系,即用户创建交易的时候需要对先前的交易单元进行验证,将验证有效的交易单元的哈希值包含到自己的交易数据结构中,则当前的交易单元称为子交易,被验证的交易称为当前交易的父交易,每笔交易可以有多个父交易,每个交易也可以有多个子交易, 这样交易单元构成有向无环图的结构。历史交易数据不可篡改,一旦更改,则会引起整个DAG区块图的变更. DAG区块链能够实现交易处理的可扩展性,随着网络中节点的增多,交易处理速度提高,交易吞吐率增加。基于DAG区块链的项目有IOTA[43]，Byteball(Obyte)[44]，Hashgraph[45]，Nano(RaiBlocks)[46]等。常见的DAG区块链共识算法有Tangle共识算法，见证人共识算法，基于DPoS的共识算法。这些共识算法在为系统提高了交易处理性能的情况下，也面临着一些列的安全性问题。第一，节点自启机制。区块链系统如何确保新加入节点的可信性。如何确保节点能够快速获取可信区块链账本。由于基于DAG区块链的系统具有交易并发性，因此每个节点维护的账本是不同的，因此如何确保新加入的节点获取的是最新的账本是需要解决的问题。第二，双花攻击问题。由于DAG区块链中允许分叉，因此容易被敌手利用发起双花攻击。共识算法需要对双花交易中的有效交易达成一致。第三，激励机制。这类区块链通常没有挖矿费用，因此需要解决节点由于没有收益而不愿意生成交易参与共识的问题。第四，长程攻击问题。由于节点生成交易并不需要耗费非常多的资源，因此节点可以通过伪造大量交易来确保自己的交易最终被确认。这些问题都会为DAG区块链带来演变中的安全问题。

### 2.2.1 Tangle共识算法

Tangle[43]是IOTA系统中采用的共识算法。在Tangle中引入权重的概念，每个交易都有一个自权重。交易的权重会随着之后直接或间接支持它的交易数量的增加而变大。当一个交易累积权重足够大，满足系统预设的确认阈值时，该交易将显示确认状态。理论上,如果整个网络中有足够多的交易流,则这个确认过程可以快到在几秒钟内完成。该共识机制的创新之处在于不再采用网络中的一个子集(如矿工)来专门负责维护共识,而是全网所有的参与者都来进行网络交易的验证工作。这个算法实现共识的过程与交易过程是一体的,共识算法在运行的同时处理交易。由于没有挖矿过程，因此采用这个共识算法的区块链系统可以在没有任何交易费用的情况下进行扩展。但是，由于共识是由全网的交易确定的，那么如果用户能够产生大量交易就可以随意控制区块链系统的共识。此外，没有交易费用就没有矿工激励，那么这类区块链系统的活性很难保证，并且面临拒绝服务攻击和垃圾信息攻击。由于DAG区块链系统是允许出现链分叉的，当节点的自权重非常大时极易发起双花攻击。这个共识算法适用于具有大交易量的系统，一旦交易流变小，可能影响安全性和性能。

### 2.2.2 基于见证人的共识算法

针对区块链中最容易出现的双花问题，Byteball[44]采用基于见证人的共识算法，通过建立与主链相关交易的全序来处理交易双花的问题。见证人通常是系统中长期实名且具有较高声誉的节点，他们维护系统并自愿频繁的发起交易单元，对于消极的见证人，可以被替换掉。最优父单元的选择是根据单元级别、见证级别以及交易的哈希值来确定的。通过选择最优父单元可以找到一条从任意顶端单元出发到创世单元的最优路径作为一条候选主链。多条候选主链会在某个交易单元处相交，这个相交的交易单元是一个稳定点。在每个节点中，从稳定点到创世单元的路径是相同的，这部分主链称为稳定主链。所有与稳定主链相关的交易单元可以进行一个全局排序，为每个单元分配一个主链号。最终建立在DAG区块链上的主链总序，使得全网达成共识。DAGCoin[48]是建立在Byteball上的区块链系统，因此采用相同的共识算法。但是Byteball中主链算法和见证人发布频率有关系，交易确认的时间是不确定的。由于Byteball基于关系数据库来存储数据，SQL语言过于紧耦合算法逻辑。在一定程度上限制了Byteball目前的扩展能力和速度。此外，为了解决IOTA和Byteball中低频次交易使得旧交易无法获得足够多新交易对其验证和引用，导致最终无法及时被确认甚至可能永远不会被确认的问题，TrustNote[49]采用双层共识的机制来解决。通过PoW的机制选择出公证共识的节点，公证节点将发布公正单元到DAG区块链上。公证共识根据公证单元严格确定其他单元的顺序。当公证单元成为主链上的稳定单元之后，公证节点才能获得公证奖励。通过找到一条以创世单元为起点的主链，并为相关交易根据主链分配主链号，建立一个主链全序来解决双花问题。为了避免出现垃圾交易，该共识算法要求所有节点提交新单元时支付交易费用。交易费用分别支付给其最小哈希子单元和公证单元的节点。通过这个激励机制还可以吸引更多节点维护账本，确保系统活性。此外也激励节点尽可能引用最新的负担元，有助于减少分叉。

### 2.2.3 基于DPoS的共识算法

Nano[46]是一种基于区块点阵(Block Lattice)结构的新型加密货币，其共识算法采用了一个用户一条链的方式，只记录自己的交易，也只有自己可以修改记录，不与其它帐户共享数据，从而使所有的交易都可以并行执行，能提供秒级的交易速度和无限可扩展性，并且允许他们异步地更新到网络的其余部分，从而以极小的资源开销获得快速的交易确认。Nano中货币流通时，需要两个交易：货币发送交易和货币接收交易。交易数据的收发可以是异步的，因此允许多笔金额同时汇入一个账户。若出现节点离线，未到账的金额会被标记，直到节点在线时完成即可。针对交易分叉问题，Nano使用的DPoS共识算法允许账户指定代表为其投票，最终得票最多的代表会广播分叉并根据高权账户在固定时间内的投票结果确定哪个分支是有效的。同时Nano中也使用了PoW共识机制，但是主要是用于交易确认。这种共识算法存在中心化程度高的缺点。此外，网络分离后重新加入时可能会影响投票过程和结果。每个节点维护自己的账本可以很好的避免自己账本被篡改的风险，如果敌手篡改自己的账本会立即被其他节点检查到，使得篡改无效。

### 2.2.4基于虚拟投票的共识算法

Hashgraph[45]共识算法使用Gossip协议[47]使得节点可以随机选择另一个节点传播自己的事件，通过对事件顺序和事件的时间戳达成共识达成最终共识。该共识算法采用虚拟投票机制和证人事件机制对事件的顺序达成共识。随后利用见证事件的顺序，根据事件的时间戳去中位数对非见证事件进行排序，最终实现所有事件的全局排序。这个全局排序很好的解决双花攻击的问题。Hashgraph是一种快速、公平和安全的共识算法，开创性的做异步BFT共识不会引发突发大规模消息传递风暴。Hashgraph利用Gossip协议和虚拟投票将共识所需的通信要求降到了最低，本地计算也保证了共识的高效性但是这个算法的共识过程比较复杂，至少需要两轮才能确定事件，并且还未在大规模公链环境下运行，安全性还没有得到具体验证。

# 3课题主要研究内容、预期目标

本课题的研究目标是针对节点资源有限和动态变化较大的场景，以减小能耗提高效率为目标，设计高效的区块链共识算法，主要内容包括以下几个方面：

1. 无线网络中基于节点稳定度的区块链共识算法

考虑在无线网络环境下，节点规模不大时，以设备低能耗和高稳定性为设计目标，设计一个快速的、低耗能的单链式区块链共识算法。

1. 无线网络中基于稳定性的K均值聚类区块链共识算法

针对大规模的异构无线网络场景，以低能耗、高稳定为设计目标，设计高效的稳定的单链式区块链共识算法。

1. 无线网络中基于节点稳定度的DAG区块链共识算法

针对无线网络中节点数量规模大的应用场景，以降低能耗、高稳定性为设计目标，设计低耗能、高吞吐量的区块链共识算法。

1. 无线网络中基于节点稳定性的聚类DAG区块链共识算法

针对大规模无线网络应用场景，以低耗能、高吞吐量、低时延为设计目标，设计高效的区块链共识算法。

# 4拟采用的研究方法、技术路线、实验方案及其可行性分析

## 4.1技术路线方案

### 4.1.1基于节点稳定度的无线区块链网络共识算法

无线网络中区块链共识算法需要满足稳定性和低能耗的目标，即在达成共识的过程中，需要在不耗费大量设备资源的情况下，快速稳定的使得所有节点状态达成一致。然而，由于无线网络节点的高动态性，节点在共识的过程中可能出现提前退出正在共识的进程，最终可能导致系统出现不一致的情况。此外，直接采用以来物理资源的共识算法也是不现实的。无线网络中节点的资源是有限的，如果每次共识都需要耗费大量的物理资源，将会使得曲线网络节点的使用寿命变短，最终使得系统的生存周期变短。在设计竞争类的区块链共识算法时，如何让其他节点认可记账节点的区块生成权力，如何避免记账节点作弊。

在无线网络应用场景中，即使节点具有很高的动态性，可能随时进入网络或者离开网络。但是有些节点在一定时间内是不会离开网络并且会比较频繁的参与到共识中。保守来看，选择这类稳定的节点作为记账者更能确保区块链共识过程的正常进行。因此，拟结合用户的稳定度和历史上参与共识频率，设计一个更加稳定、低能耗的区块链共识算法。

研究方案：

1. 网络建模：由多个随机部署的无线区块链网络节点组成系统是由许多无线设备和关联的基站构成。每个无线设备都可以可以看成一个无线节点，他们之间可以通过基站通信。每个节点既可以成为共识节点，也可以只作为一般节点，并且局部地维护自己的区块链和一个节点活跃度列表。
2. 共识节点选取：区块链系统中，节点通过定期的发送请求/响应消息，从而确定各个无线节点的活跃度。活跃度计算如下：在发送请求消息之后，自身节点的活跃度加一。回复响应消息的节点的活跃度计数加一。若节点未响应，则该节点活跃度减半。活跃度越高的节点，其稳定性会越高。我们可以根据节点的活跃度和节点在最近个区块中参与共识比值来选出具有较好稳定性的节点作为共识节点。计算公式为
3. 基于稳定度的共识算法：区块链的共识过程分为两个步骤：第一步是选择共识节点，第二步达成全局共识。共识节点的选择规则是根据节点的稳定度，选择最高稳定的节点作为共识节点。共识过程如下：首先节点产生交易之后，将会广播交易到网络中。节点计算所有节点的稳定度，如果发现自己的稳定度最高，则打包交易成为区块广播到网络中。接收到最新区块的节点会验证区块生成者的有效性和区块的有效性，如果验证成功，广播接受消息。当节点接收到大部分接受消息则将区块链接到本地区块链上。当一个节点生成区块成功后，其活跃度可以适当的下调，从而避免有节点由于活跃度过高一直获得区块生成权限。分叉问题：当同时出现两个具有相同稳定度的区块时，则系统会接受区块哈希较小的那个。区块链也不允许分叉，一旦出现分叉则采用最长链原则确定主链。奖惩机制：生成区块成功的节点将获得部分区块奖励，剩余部分区块奖励将分发给后面个区块的生成者。诚实节点更愿意在区块链之后添加新的区块。一旦发现有节点作恶，则会将该节点的活跃度直接清零。他将在很长一段时间内都不能获得生成区块的权限，从而降低节点作恶的动机。由于节点作恶的时候可能会导致其自身部分奖励失效，从而也就使得系统更加的安全。

### 4.1.2基于稳定性的PBFT无线区块链网络共识算法

在无线网络场景中，节点（无线设备）的资源是非常有限的，并且具有动态性。区块链系统中节点的动态性会影响达成全网共识的过程。单共识节点的算法通常无法实现强一致性，并且共识延时较长，吞吐量也受限于区块大小和区块生成时间间隔，因此这类算法并不高效。因此，拟针对资源有限且具有高动态性的无线网络环境，以稳定性和低共识时延为设计目标，设计具有高吞吐量和低时延的区块链共识算法。

研究方案：

1. 网络建模：区块链系统是由许多无线设备和关联的基站构成。每个无线设备都可以可以看成是一个无线节点，他们之间可以通过基站通信。每个节点既可以成为共识节点，也可以只作为一般节点，并且局部地维护自己的区块链和一个节点活跃度列表。
2. 共识委员会选取：区块链系统中，节点通过定期的发送请求/响应消息，从而确定各个无线节点的活跃度。活跃度计算如下：在发送请求消息之后，自身节点的活跃度增加。回复响应消息的节点的活跃度计数增加。若节点未响应，则该节点活跃度降低。活跃度越高的节点，其稳定性会越高。我们可以根据节点的活跃度和节点在最近个区块中参与共识比值来选出具有较好稳定性的节点作为共识节点。计算公式为

委员会成员的选取根据节点的稳定度，将选出稳定度排名的前个作为当前共识轮的委员会成员。

1. 基于稳定度的PBFT共识算法：区块链的共识过程分为以下步骤：第一步是选择共识节点，第二步选出块生成者，第三步执行PBFT共识算法达成全局共识。共识委员会成员的选择是根据节点的稳定度，选择具有最高稳定性的前节点作为成员。随后，选择稳定度最高的成员作为区块生成者。共识过程如下：PrePrepare阶段：具有最高稳定度的节点打包交易成为区块，将区块构造PrePrepare消息广播给所有其他成员。Prepare阶段：接收到PrePrepare消息后，成员会对区块进行验证。验证成功后，成员将会广播Prepare消息给所有其他成员。Commit阶段：当成员接收到个成员的Prepare消息后，则验证消息的有效性，成功验证后将广播Commit消息给所有成员。当成员接收到条Commit消息时，委员会成员将区块链接到本地链上。奖惩机制：生成区块的奖励将分发给后面个区块的生成者。在完成一轮区块确认之后，所有的委员会成员的活跃度将下调。从而避免有些活跃度高的节点长期被选作委员会的成员从而提高作恶的机会。一旦发现有节点作恶，则会将该节点的活跃度直接清零。他将在很长一段时间内都不能成为委员会成员，从而降低节点作恶的动机。
2. 检查点机制；检查点机制用于对执行结果进行校验。检查点的大小默认设置为个区块，节点在写入到的整数倍个区块后达到一个检查点。此时广播该检查点的信息对区块链的一致性进行校验，校验成功则系统达到了一个稳定检查点。

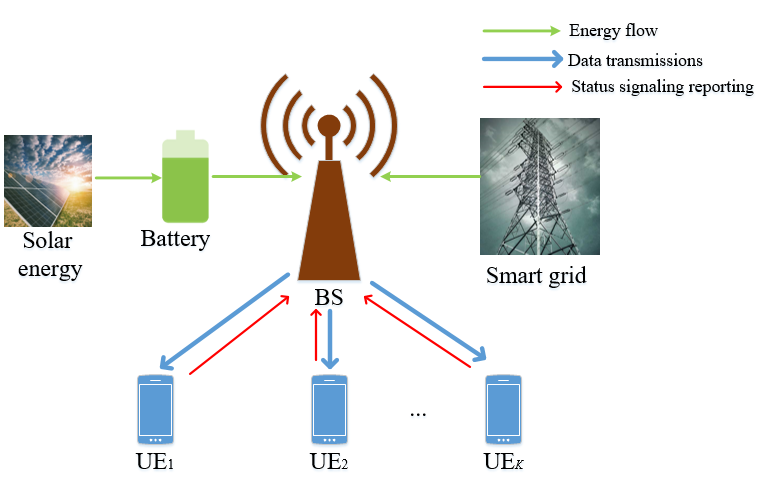


图2

### 4.1.3基于稳定度的分片PBFT区块链共识算法

在大规模无线网络环境下的区块链系统，实现具有高吞吐量和低共识延时是共识算法设计的重要目标。然而，当无线信道资源有限且具有高动态性时，使用单链式存储的区块链系统的吞吐量是有限的。其次，当参与共识的节点数量增加时，会使得每个节点需要需要与更多节点进行通信。减少参与共识节点的数量来减少通信可以解决通信资源有限的问题。但是这会降低系统的拜占庭故障节点容错率，并且会使得网络的中心化程度变高。因此，拟针对高动态大规模无线网络环境下，考虑无线节点资源有限性、移动性以及节点共识的通信复杂度，以提升区块链系统的性能，降低共识的能耗为设计目标，设计高吞吐量、高稳定性、低共识时延的BFT共识算法。

研究方案：

1. 网络建模：区块链系统是由许多无线网络节点构成。通过网络协议可以在节点建立连接，进行消息传输等功能。节点具有可移动性，每个节点既可以成为共识节点，也可以只作为一般节点。通过聚类算法将网络进行分片，每个分片网络会选出一个簇头。每个网络节点局部地维护自己的区块链和一个节点活跃度列表。
2. 簇头节点选取：区块链系统以时间段的方式工作。每一个时间段作为一个簇头节点的任期。每个时间段开始之前先选出一部分簇头节点。这些节点会协调其所在的分片达成局部共识。随后再携带共识结果进行一轮全局共识。在共识完成之后，簇头节点将公式写过发布给所在分片的所有节点。簇头节点的选择则是根据节点的活跃度和参与共识的区块比例加权得到，计算公式如下：

网络分片的簇头节点的选取根据节点的稳定度，将选出分片中稳定度最高的作为当前任期的簇头。

1. 共识过程：区块链系统的公式过程可以分为两部分：局部共识和全局共识。局部共识过程：各个节点根据稳定度选出最稳定的节点作为所在分片的簇头节点。随后簇头节点打包一部分交易在所在分片达成共识。达成共识的过程可采用门限签名算法，也可以直接采用PBFT共识算法。全局共识过程：通过VRF算法，区块链上最后一个一个区块作为输入选出此任期内的全局主节点所在的分片编号。各分片簇头将其分片的结果发送给该全局主节点，随后所有的簇头节点执行PBFT算法达成全局共识。奖惩机制：最终区块的奖励将分发给所有参与全局共识的簇头节点。在完成一轮区块确认之后，所有的簇头节点的活跃度将下调。从而避免有些活跃度高的节点长期被选作簇头从而提高作恶的机会。一旦发现有节点作恶，则会将该节点的活跃度直接清零，从而降低节点作恶的动机。
2. 检查点机制；检查点机制用于对执行结果进行校验。检查点的大小默认设置为个任期，节点在任期编号为的整数时达到一个检查点。此时，广播该检查点的信息对区块链的一致性进行校验，校验成功则系统达到了一个稳定检查点。

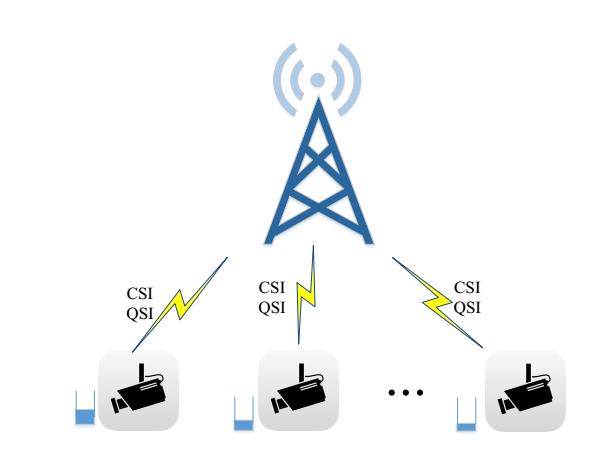


图3

### 4.1.4基于稳定度的DAG区块链共识算法

大规模无线网络环境下，无线信道资源有限时，当节点数量增加会导致共识过程通信增加。单链式存储的区块链系统的吞吐量会降低，全局共识延时会增加。其次，由于无线节点的高动态性，每个节点维护的区块链可能会不一致。单链式区块链系统是不允许区块链分叉。简单的检查机制可以确保区块链的全局一致性，但是网络规模庞大会使得这个检查过程非常的缓慢，进一步影响区块链系统的性能。因此，拟针对大规模高动态无线网络环境，考虑无线节点资源有限性、移动性，以提升区块链系统的性能，降低共识的能耗以及允许区块链分叉为设计目标，设计高吞吐量、高稳定性、低共识时延的共识算法。

研究方案：

1. 网络建模：区块链系统是由许多无线网络节点构成。通过网络协议可以在节点建立连接，进行消息传输等功能。节点具有可移动性，每个节点既可以成为共识节点，也可以只作为一般节点。节点通过解决一个小地哈希难题来获得产生交易权限。节点可直接将产生地交易根据系统规则添加到局部地维护的DAG区块链并广播。每个节点需要维护所有节点活跃度列表。
2. 见证委员会选取：由于DAG区块链存储的特殊性，对于交易的确认通常是根据其累积支持交易的数量来决定的。由于在DAG区块链中链分叉是合法的，双花问题成为这类区块链系统亟需解决的一个难题。在DAG区块链系统中，可以通过选定一条主链来构建一个交易的全序。即使出现双花交易，也可以根据交易的全序安全的拒绝后出现的交易。系统可以通过每个交易维护的见证列表中节点产生的见证交易成为稳定交易来确定主链进而确定各个交易的主链指数。根据主链指数来确定交易的先后顺序。由于节点的高动态性，因此见证委员的选取需要具有足够的稳定性。此外，见证委员也需要一定的可信性确保他们不太会作恶。因此，设计见证委员会成员的选举同时具有高活跃性和高信任度。权重系数：

选取个节点作为一个交易的见证列表成员，这些节点可以正常生成交易。

1. 共识过程：节点在产生新的交易之前，会持续追踪其局部DAG区块链的一条主链。根据主链选出其最好的父交易，并选出新交易的一个见证列表成员。该节点产生的新交易将会引用其父交易，并广播该新交易到网络中。当新单元到达时，当前的主链会不断变化，但是当前主链足够老的那部分会保持不变。因此，未来所有的主链在回溯时最终都会汇聚到某个主链单元。若基于当前的非稳定单元集合构造一条当前主链，并且在一些非见证交易单元出现分叉时，根据引用该交易的后代交易单元中见证列表成员数量来决定主链，提高主链的可信性。最终构建一条主链，并给主链上的交易非陪一个全序指数。非主链上的交易的主链指数设置为最先引用该交易的主链交易的主链指数。从而可以确定哪些冲突交易该被放弃。最终确保共识的达成。

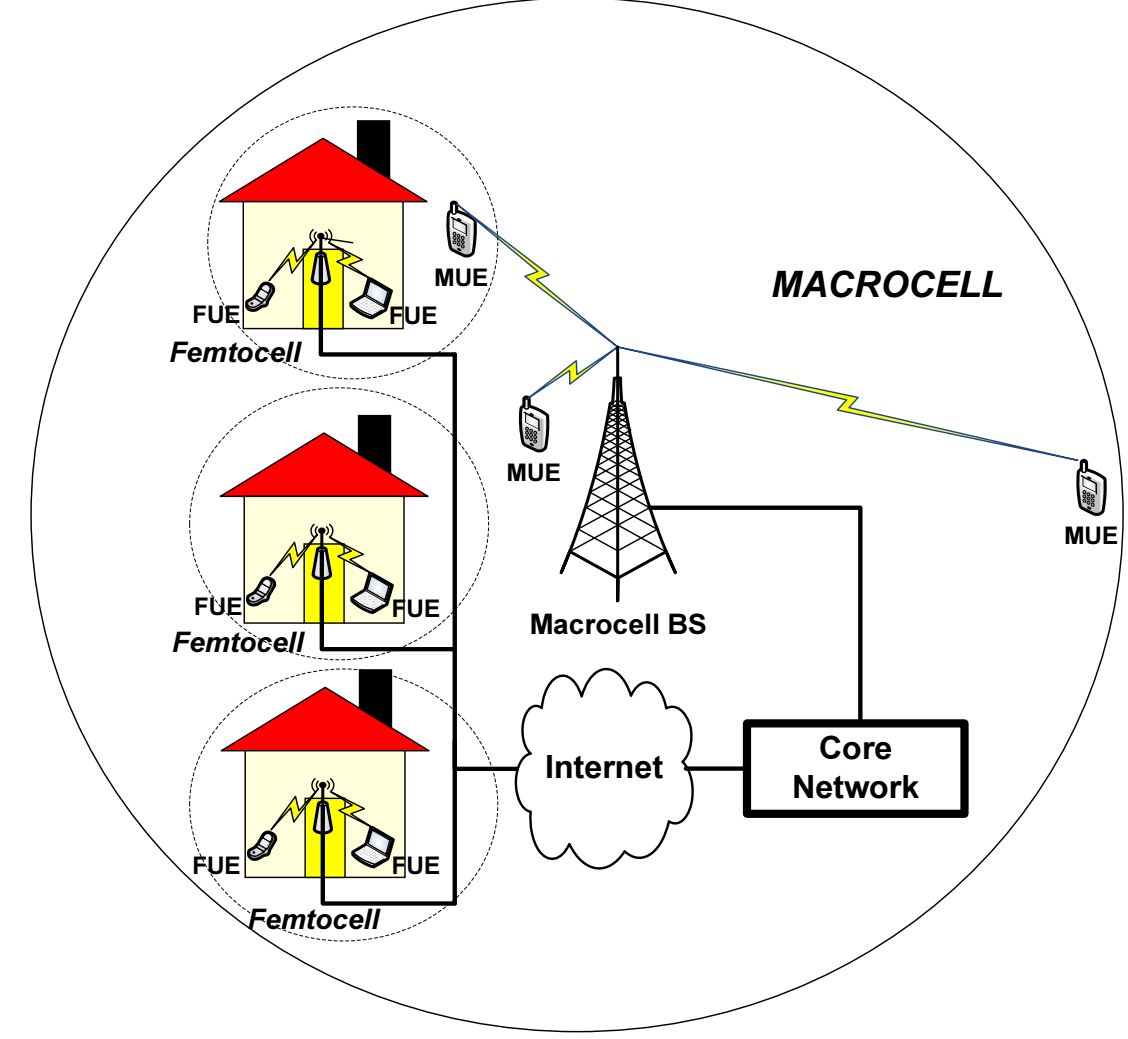


图4

## 4.2可行性分析

本课题拟定的研究内容和研究方案是作者在已有工作成果，在对实际应用需求充分调研，并对当前研究现状详细分析基础上提出的。同时，国内外学者在区块链共识算法的研究中取得了大量的研究成果，这些都为本课题的研究奠定了坚实的基础，提供了可借鉴的内容。

除了上述分析之外，本人已经查阅了大量该领域的研究论文，并且熟悉多种编程语言和多种仿真手段。因此，本课题的研究方案是切实可行的。

# 5研究工作计划与进度安排

2021年12月-2022年6月：

调研区块链的应用和区块链共识算法最新研究状况。

研究基于稳定度的无线区块链网络共识算法。

研究基于稳定度的无线区块链网络BFT共识算法。

2022年7月-2022年12月：

研究基于稳定度的无线区块链网络分片共识算法。

研究基于稳定度的无线DAG区块链网络共识算法。

2023年1月-2022年5月：

撰写和提交毕业论文。

# 参考文献：

[1] S. Nakamoto Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. https://bitcoin.org/bitcoin.pdf, 2008.

[2] G. Wood. Ethereum: A Secure Decentralized Generalized Transaction Ledger. Ethereum Project Yellow Paper, vol. 151, pp. 1-32, 2014.

[3] C. Dwork and M. Naor,Pricing via processing or combatting junk mail[C]. In: Advances in Cryptology— CRYPTO’92. Springer Berlin Heidelberg, 1993: 139–147. [DOI: 10.1007/3-540-48071-4\_10

[4] A. Back, . Hashcash—A denial of service counter-measure[EB/OL]. 2002. http://www.hashcash.org/papers/hashcash.pdf.

[5] M.Jackbsson and A.Juels.Proofs of Work and Bread Pudding Protocols[C]// Ifip Tc6/tc11 Joint Working Conference on Secure Information Networks: Communications & Multimedia Security. Kluwer, B.V. 1999.

[6] J. Garay, A. Kiayias, and N. Leonardos. The Bitcoin Backbone Protocol: Analysis and Applications. In Proceedings of the 34th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques, Sofia, Bulgaria, 2015.

[7] R. Pass, L. Seeman, and A. Shelat. Analysis of the Blockchain Protocol in Asynchronous Networks. Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques Springer, Cham, 2017.

[8] I. Eyal, The Miner’s Dilemma. 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy, San Jose, CA, May 2015, pp. 89-103, doi: 10.1109/SP.2015.13.

[9] R. Pass, E. Shi. Fruitchains: A fair blockchain. In Proceedings of the ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, ser. PODC ’17. ACM, 2017, pp. 315–324. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/3087801.3087809

[10] E.Heilman, A.Kendler, A.Zohar, et al. Eclipse attacks on Bitcoin's peer-to-peer network[c]. In: Proceedings of 24th USENIX Security Symposium (USENIX Security 15). USENIX, 2015: 129–144.

[11] I. Eyal, The Miner’s Dilemma. 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy, San Jose, CA, May 2015, pp. 89-103, doi: 10.1109/SP.2015.13.

[12] I. Eyal, E. G. Sirer. Majority is not Enough: Bitcoin Mining is Vulnerable. In Financial Cryptography and Data Security. Springer, November 2014, pp. 436õ454.

[13] S. King, S. Nadal. PPCoin: Peer-to-peer crypto-currency with proof-of-stake. https://archive.org/details/PPCoinPaper (2012).

[14] Buterin V , Griffith V . Casper the Friendly Finality Gadget[J].2017. https://arxiv.org/pdf/1710.09437.pdf

[15] A. Kiayias, A. Russell,B. David, et al. Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol[C]. In: Advances in Cryptology—CRYPTO 2017, Part I. Springer Berlin Heidelberg, 2017: 357–388. [DOI: 10.1007/978-3-319-63688-7\_12]

|  |
| --- |
|  |

[16] B. David, P.Gazi, A. Kiayias, et al. Ouroboros Praos: An adaptively-secure, semi-synchronous proof-of-stake Blockchain[C]. In: Advances in Cryptology—EUROCRYPT 2018, Part II. Springer Cham, 2018: 66–98. [DOI:10.1007/978-3-319-78375-8\_3]

[17] [C. Ganesh](https://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28C%20Ganesh%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson)，[C. Orlandi](https://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28C%20Orlandi%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson)，[D. Tschudi](https://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28D%20Tschudi%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson), Proof-of-stake protocols for privacy-aware Blockchains[C]. In: Advances in Cryptology—EUROCRYPT 2019, Part I. Springer Cham, 2019: 690–719. [DOI: 10.1007/978-3-030-17653-2\_23]

[18] C. Badertscher, P. Gazi, A. Kiayias, et al. Ouroboros Genesis: Composable proof-of-stake Blockchainswith dynamic availability[C]. In: Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS 2018). ACM, 2018: 913–930. [DOI: 10.1145/3243734.3243848]

[19] P. Debian, R. Pass, E. Shi. Snow White: Robustly reconfgurable consensus and applications to provably secure proofs of stake[J]. IACR Cryptology ePrint Archive, 2017: 2016/919. https://eprint.iacr.org/2016/919.pdf

[20] I. Grigg. EOS—An introduction[EB/OL]. 2017. https://eos.io/documents/EOS\_An\_Introduction.pdf.

[21] N. Houy. It will cost you nothing to ‘kill’ a proof-of-stake crypto-currency[EB/OL]. 2014. ftp://ftp.gate.cnrs.fr/RePEc/2014/1404.pdf.

[22] A. Chepurnoy. Interactive proof-of-stake[EB/OL]. 2016. http://arxiv.org/abs/1601.00275.

[23] J. Kwon. Tendermint: Consensus without mining. Draft v. 0.6, fall, 1(11), 2014. https://tendermint.com/static/docs/tendermint.pdf.

[24] P. Gazi, A. Kiayias, A. Russell. Stake-bleeding attacks on proof-of-stake Blockchains[C]. In: Proceedings of 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT 2018). IEEE, 2018: 85–92. [DOI: 10.1109/ CVCBT.2018.00015]

[25] C. Decker, J. Seidel, R. Wattenhofer. Bitcoin Meets Strong Consistency. In Proceedings of the 17th International Conference on Distributed Computing and Networking. ACM, 2016: 13:1–13:10. [DOI:  
10.1145/2833312.2833321]

[26] E. Kokoris- Kogias, P. Jovanovic, N. Gailly, I. Khoffi, L. Gasser, B. Ford. Enhancing Bitcoin security and performance with strong consistency via collective signing. In Proc. 25th conference on USENIX Security Symposium, 2016 : 279–296.

[27] I. Abraham, D. Malkhi, K. Nayak, et al. Solida: A Blockchain protocol based on reconfgurable Byzantine consensus[C]. In: Proceedings of 21st International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2017). Lisbon, Portugal, December 18–20, 2017: 25:1–25:19. [DOI: 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2017.25]

[28] R. Pass, E. Shi. Hybrid consensus: Efcient consensus in the permissionless model[C]. In: Proceedings of 31st International Symposium on Distributed Computing (DISC 2017). Vienna, Austria, October 16–20, 2017: 39:1–39:16. [DOI: 10.4230/LIPIcs.DISC.2017.39]

[29] Y.Gilad, R. Hemo, S. Micali, et al. Algorand: Scaling Byzantine agreements for cryptocurrencies[C]. In: Proceedings of the 26th Symposium on Operating Systems Principles, Shanghai, China, October 28–31, 2017: 51–68. [DOI: 10.1145/3132747.3132757]

[30] L.Luu, V. Narayanan, C. Zheng, et al. A secure sharding protocol for open Blockchains[C]. In: Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. ACM, 2016: 17–30. [DOI: 10.1145/2976749.2978389]

[31] E. Kokoris- Kogias, P. Jovanovic, L. Gasser, et al. OmniLedger: A secure, scale-out, decentralized ledger via sharding[C]. In: Proceedings of 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP 2018). IEEE, 2018: 583–598. [DOI: 10.1109/SP.2018.000-5]

[32] P.Schindler, A. Judmayer, N. Stifter, et al. HydRand: Practical continuous distributed randomness[J]. IACR Cryptology ePrint Archive, 2018: 2018/319. https://eprint.iacr.org/2018/319.pdf.

[33] M. AL-Bassam,A. Sonnino, S. Bano, et al. Chainspace: A sharded smart contracts platform[C]. In: Proceed ings of 25th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS 2018). San Diego, CA, USA, February 18–21, 2018. http://wp.internetsociety.org/ndss/wp-content/uploads/sites/25/2018/02/ndss2018\_09-2\_Al-Bassam\_paper.pdf.

[34] M. Zamani, M. Movahedi, M. Raykova. RapidChain: Scaling Blockchain via full sharding[C]. In: Proceed ings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS 2018). Toronto, ON, Canada, October 15–19, 2018: 931–948. [DOI: 10.1145/3243734.3243853]

[35] A. Manuskin, M. Mirkin, I.Eyal. Ostraka: Secure Blockchain scaling by node sharding[EB/OL]. 2019.http://arxiv.org/abs/1907.03331.

[36] H.Dang, T.T.A.DINH, D. Loghin, et al. Towards scaling Blockchain systems via sharding[C]. In: Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data (SIGMOD 2019). ACM, 2019: 123–140. [DOI:  
10.1145/3299869.3319889]

[37] A.Sonnino, S. Bano, M. AL-Bassam, et al. Replay attacks and defenses against cross-shard consensus in  
sharded distributed ledgers[EB/OL]. 2019. http://arxiv.org/abs/1901.11218

[38] A. Miller, A. Juels, E. SHI E, et al. Permacoin: Repurposing Bitcoin work for data preservation[C]. In: proceedings of 2014 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP 2014). IEEE, 2014: 475–490. [DOI: 10.1109/SP.2014.37]

[39] A. Sonnino, S. Bano, M. AL-Bassam, et al. Replay attacks and defenses against cross-shard consensus in sharded distributed ledgers[EB/OL]. 2019. http://arxiv.org/abs/1901.11218

[40] HyperLedger, Intel: Sawtooth Lake (2017). [PoET 1.0 Specification — Sawtooth v1.2.6 documentation (hyperledger.org)](https://sawtooth.hyperledger.org/docs/core/releases/latest/architecture/poet.html#introduction)

[41] D. Schwartz, N. Youngs, A. r Britto. The Ripple Protocol Consensus Algorithm[EB/OL]. https://ripple.com/files/ripple\_consensus\_whitepaper.pdf, 2018.

[42] B. Chase, E. Macbroughe. Analysis of the XRP Ledger Consensus Protocol[EB/OL]. arXiv:1802.07242 [cs.DC]. https://arxiv.org/pdf/1802.07242v1.pdf, 2018.

[43] S.Popov. The Tangle [EB/OL]. 2016. WWW.descryptions.com/Iota.pdf, 2018.

[44] A. Churyumov. Byteball: A decentralized system for storage and transfer of value[EB/OL]. 2016.  
https://byteball.org/Byteball.pdf.

[45] B. Leemon, H. Mance, M. Paul. Hedera: A governing council and public hashgraph network[EB/OL]. 2018.  
https://www.hedera.com/hh-whitepaper-v1.4-181017.pdf.

[46] C. Lemhieu．Nano:A feeless distributed cryptocurrency network[EB/OL]． https://content.nano.org/whitepaper/Nano\_Whitepaper\_en.pdf

[47] Y. Sompolinsky, A. Zohar. Secure high-rate transaction processing in Bitcoin[C]. In: Financial Cryptography and Data Security—FC 2015. Springer Berlin Heidelberg, 2015: 507–527. [DOI:10.1007/978-3-662-47854-7\_32]