区块链与数字货币

浙江大学 杨小虎

2023年9月22日

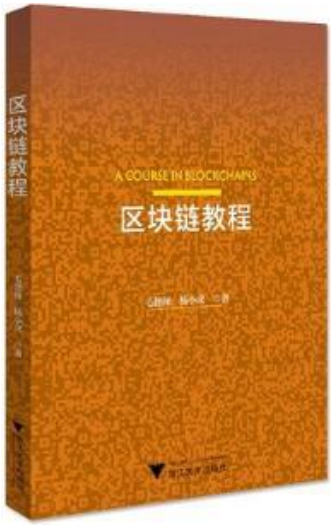
教学安排

- 数字货币和区块链技术原理
- 比特币区块链技术分析
- 以太坊技术原理与架构
- 智能合约与DApp开发
- HyperLedger Fabric技术原理与架构
- 数字货币和区块链发展趋势

课程考核

- 课程平时作业与课堂表现：40分
- 期末考试：60分

项目	占总成绩比例	备注
作业1	10%	区块链技术原理
作业2	20%	以太坊应用开发
作业3	10%	Fabric
期末考试	60%	开卷，可带一张A4纸



毛德操、杨小虎著，

《区块链教程》，

浙江大学出版社，2021.

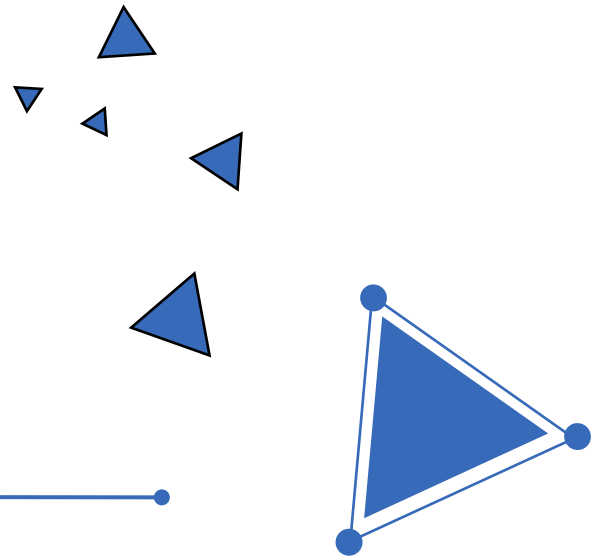
毛德操著，

《区块链技术》，

浙江大学出版社，2019.

参考资料：比特币、以太坊、HyperLedger等网上资料

01 基础知识



基础知识

1. 货币
2. Hash算法
3. 加密算法

货币知识

- 货币的价值
  - 使用价值
  - 交换价值
- 货币的形式
  - 贵金属：金、银、铜
  - 纸币
  - 数字货币

交子，宋代出现，世界上最早的纸币

货币知识

- 纸币的本质：信用
  - 金本位
  - 国家信用
  - 布雷顿森林体系
    - 美元与黄金锚定，每一美元的“含金量”为0.888671克黄金
    - 其他国家的法定货币与美元挂钩，规定与美元间的汇率
    - 实行可调整的固定汇率。各国货币对美元的汇率只可在法定汇率±1%的范围内波动。
    - 1944年启动，1971年结束

货币知识

- 纸币的全球化
  - 国际货币基金组织特别提款权
    - 特别提款权的价值最初确定为相当于0.888671克纯金，当时也相当于 1 美元。在布雷顿森林体系解体后，特别提款权价值被重新定义为一篮子货币。
    - 执董会每五年或在必要时提前检查特别提款权篮子，以确保特别提款权能反映各组成货币在世界贸易和金融体系中的相对重要性。
    - 特别提款权的价值：根据伦敦时间中午左右观察到的即期汇率，每日确定特别提款权的美元价值，并在基金组织网站上公布。

货币	2015年检查中确定的权重	货币单位的固定数量，为期五年，自2016年10月1日起
美元	41.73	0.58252
欧元	30.93	0.38671
人民币	8.33	1.0174
日元	8.09	11.900
英镑	10.92	0.085946

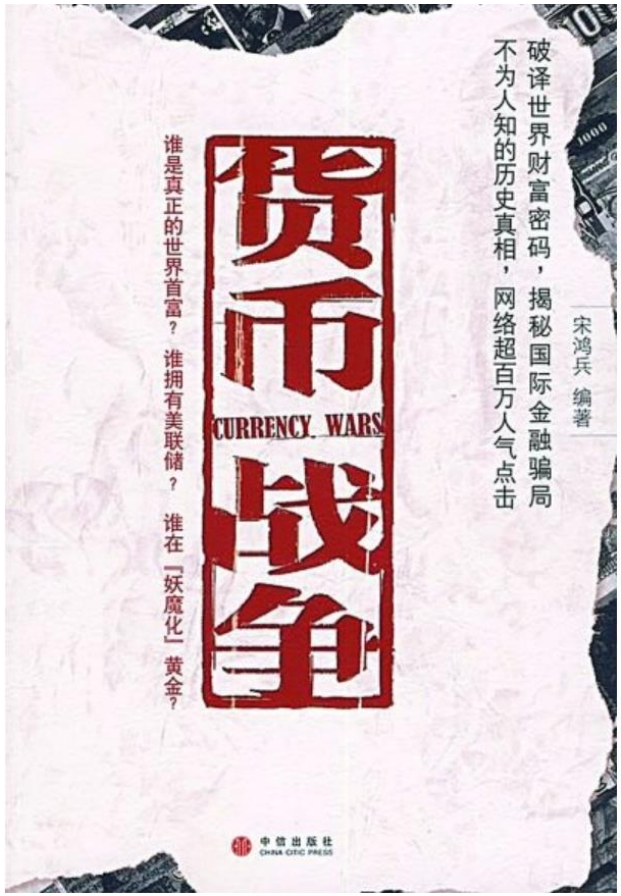
货币知识

- 纸币的全球化
  - 美元、欧元、英镑、日元……
  - 国际货币基金组织特别提款权
    - 特别提款权是国际货币基金组织为了补充国际储备资产的不足，创设的一种新的国际储备资产和记账单位，是IMF按照成员国缴存的基金份额分配给各成员国的，分配后就成为该成员国的资产，并与黄金和外汇一起构成该成员国的国际储备资产。
    - 当成员国发生国际收支逆差时，可将特别提款权划给另一个成员国，换取可兑换货币来密闭逆差，特别提款权还可用来偿还基金组织的贷款，但它不能兑换黄金，不能直接用于国际贸易或非贸易的支付，所以，特别提款权只是成员国在国际货币基金组织的特别提款权账户的一种账面资产。

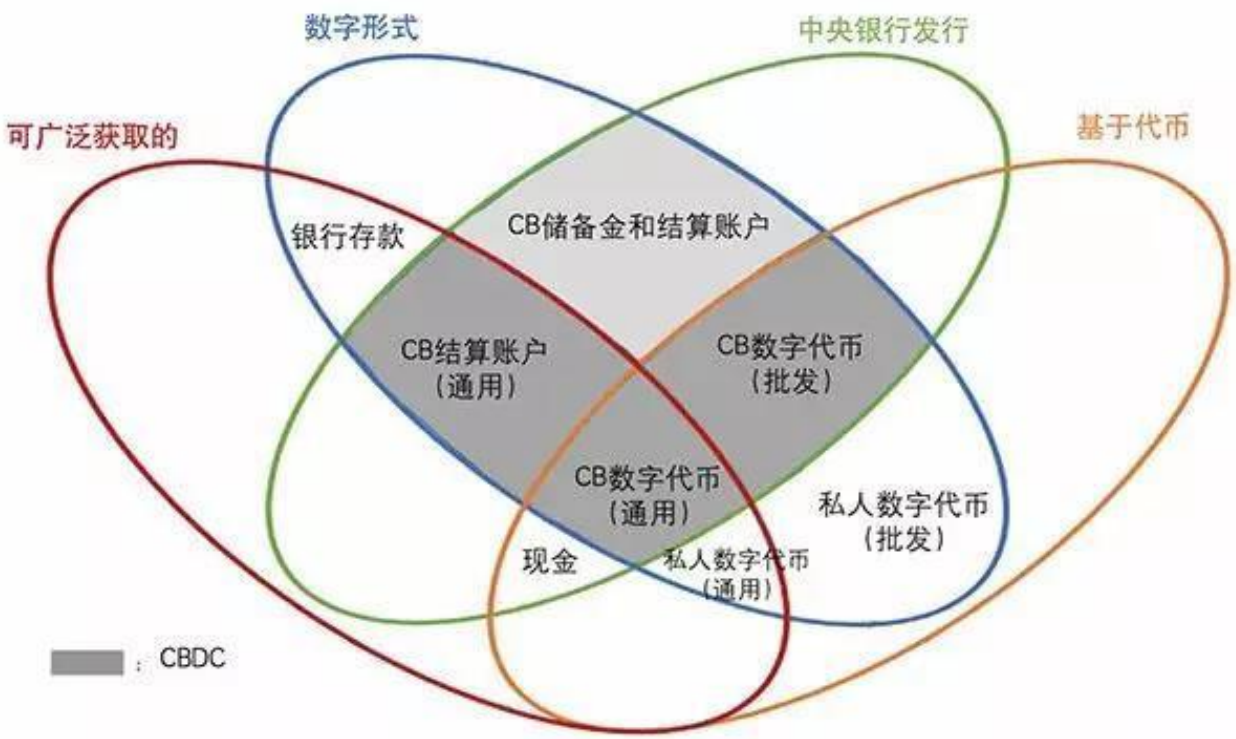
货币理论

- 马克思政治经济学
  - 商品的使用价值与交换价值
- 凯恩斯经济学
  - 市场这只“看不见的手”有时候会失灵，需要政府干预
- 哈耶克经济学
  - 自由市场、自由经营、自由竞争、自动调节、自动均衡
  - 货币非国有化
- 现代货币理论MMT
  - 货币的本质就是欠条，即IOU（I Owe You）

货币战争？


破译世界财富密码，揭秘国际金融骗局
不为人知的历史真相，网络超百万人气点击
宋鸿兵 编著
货币战争
CURRENCY WARS
谁是真正的世界首富？谁拥有美联储？谁在「妖魔化」黄金？
中信出版社
CHINA CITIC PRESS

货币之花



注：CB代表中央银行，CBDC代表中央银行数字货币。

Hash算法

- 把任意长度的输入通过hash算法变换成固定长度的输出，该输出就是hash值。
  - 输入域（空间）大于输出域（空间）。
  - 两个不同的输入可能会产生两个相同的输出，称为碰撞。
  - 从输出无法推导出输入。

最简单的hash算法

x mod y = z（整数取模运算）

x，y，z均为整数，其中y是质数，y不能为0

例：

y=7

9mod7=2；10mod7=3；50mod7=1，100mod7=2……

寻找一个足够大的质数y，可以实现长度为y的哈希表

Hash算法

- Hash实际上是一种思想，包含很多算法。
- 应用：
  - 快速定位（数据库中散列表）
  - 错误校验
  - 唯一性验证
- 常见算法：MD4、MD5、SHA1、SHA2

hash算法的安全性

- 逆向困难：难以从输出推导出输入。
  - MD、SHA算法都不可逆。
- 抗碰撞：很难找到两个不同的输入，可以产生相同的输出。
  - MD4、MD5已经被王小云教授攻破。
  - 王小云的研究成果是给定消息 M1，能够计算获取 M2，使得 M2 产生的hash值与 M1 产生的hash值相同。

安全哈希算法SHA256

- SHA-2，Secure Hash Algorithm 2的缩写，一种安全hash算法标准，由美国国家安全局National Security Agency研发。
- SHA256是SHA-2下细分出的一种算法，对于任意长度的输入数据，SHA256都会产生一个256bit长的哈希值，通常用一个长度为64的十六进制字符串来表示
  - 例如：A7FCFC6B5269BDCCE571798D618EA219A68B96CB87A0E21080C2E758D23E4CE9
- SHA256的安全性
  - 输出为256位，输出空间是2^{256}，是“亿亿亿亿亿亿亿亿”。
  - 目前尚未有破解方法。

安全哈希算法SHA256

```
Note: All variables are unsigned 32 bits and wrap modulo 232 when calculating


Initialize variables
(first 32 bits of the fractional parts of the square roots of the first 8 primes 2..19):
h0 := 0x6a09e667
h1 := 0xbb67ae85
h2 := 0x3c6ef372
h3 := 0xa54ff53a
h4 := 0x510e527f
h5 := 0x9b05688c
h6 := 0x1f83d9ab
h7 := 0x5be0cd19


Initialize table of round constants
(first 32 bits of the fractional parts of the cube roots of the first 64 primes 2..311):
k[0..63] :=
   0x428a2f98, 0x71374491, 0xb5c0fbcf, 0xe9b5dba5, 0x3956c25b, 0x59f111f1, 0x923f82a4, 0xab1c5ed5,
   0xd807aa98, 0x12835b01, 0x243185be, 0x550c7dc3, 0x72be5d74, 0x80deb1fe, 0x9bdc06a7, 0xc19bf174,
   0xe49b69c1, 0xefbe4786, 0x0fc19dc6, 0x240ca1cc, 0x2de92c6f, 0x4a7484aa, 0x5cb0a9dc, 0x76f988da,
   0x983e5152, 0xa831c66d, 0xb00327c8, 0xbf597fc7, 0xc6e00bf3, 0xd5a79147, 0x06ca6351, 0x14292967,
   0x27b70a85, 0x2e1b2138, 0x4d2c6dfc, 0x53380d13, 0x650a7354, 0x766a0abb, 0x81c2c92e, 0x92722c85,
   0xa2bfe8a1, 0xa81a664b, 0xc24b8b70, 0xc76c51a3, 0xd192e819, 0xd6990624, 0xf40e3585, 0x106aa070,
   0x19a4c116, 0x1e376c08, 0x2748774c, 0x34b0bcb5, 0x391c0cb3, 0x4ed8aa4a, 0x5b9cca4f, 0x682e6ff3,
   0x748f82ee, 0x78a5636f, 0x84c87814, 0x8cc70208, 0x90befffa, 0xa4506ceb, 0xbef9a3f7, 0xc67178f2


Pre-processing:
append the bit '1' to the message
append k bits '0', where k is the minimum number >= 0 such that the resulting message
    length (in bits) is congruent to 448(mod 512)
append length of message (before pre-processing), in bits, as 64-bit big-endian integer


Process the message in successive 512-bit chunks:
break message into 512-bit chunks
for each chunk
    break chunk into sixteen 32-bit big-endian words w[0..15]
```

```
    Extend the sixteen 32-bit words into sixty-four 32-bit words:
    for i from 16 to 63
        s0 := (w[i-15] rightrotate 7) xor (w[i-15] rightrotate 18) xor(w[i-15] rightshift 3)
        s1 := (w[i-2] rightrotate 17) xor (w[i-2] rightrotate 19) xor(w[i-2] rightshift 10)
        w[i] := w[i-16] + s0 + w[i-7] + s1

    Initialize hash value for this chunk:
    a := h0
    b := h1
    c := h2
    d := h3
    e := h4
    f := h5
    g := h6
    h := h7

    Main loop:
    for i from 0 to 63
        s0 := (a rightrotate 2) xor (a rightrotate 13) xor(a rightrotate 22)
        maj := (a and b) xor (a and c) xor(b and c)
        t2 := s0 + maj
        s1 := (e rightrotate 6) xor (e rightrotate 11) xor(e rightrotate 25)
        ch := (e and f) xor ((not e) and g)
        t1 := h + s1 + ch + k[i] + w[i]
        h := g
        g := f
        f := e
        e := d + t1
        d := c
        c := b
        b := a
        a := t1 + t2

    Add this chunk's hash to result so far:
    h0 := h0 + a
    h1 := h1 + b
    h2 := h2 + c
    h3 := h3 + d
    h4 := h4 + e
    h5 := h5 + f
    h6 := h6 + g
    h7 := h7 + h

Produce the final hash value (big-endian):
digest = hash = h0 append h1 append h2 append h3 append h4 append h5 append h6 append h7
```

https://blog.csdn.net/u011583927/article/details/80905740

加密算法

最简单的加密算法：凯撒密码

- 明文字母表：ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
- 密文字母表：DEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZABC

- 明文：THE QUICK BROWN FOX JUMPS OVER THE LAZY DOG
- 密文：WKH TXLFN EURZQ IRA MXPSV RYHU WKH ODCB GRJ

加密算法

M是明文， C是密文

E是加密函数，D是解密函数，k是密钥

$$E_k(M)=C$$

$$D_k(C)=M$$

$$D_k(E_k(M))=M$$

加密算法

M是明文， C是密文
E是加密函数，D是解密函数，k1, k2是密钥

$$E_{k1}(M)=C$$

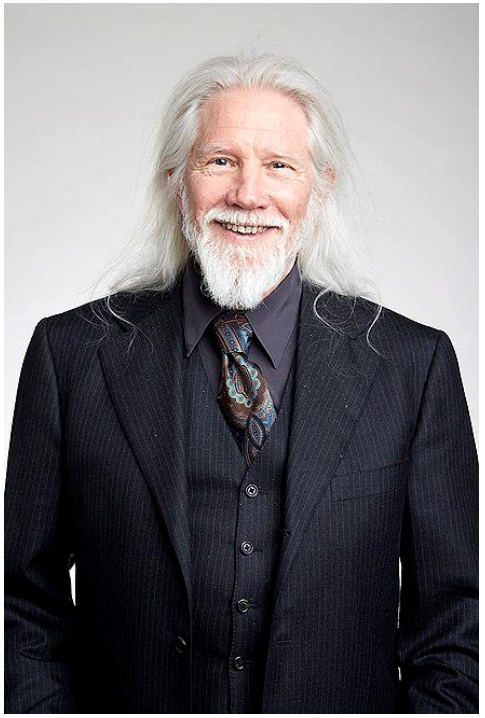
$$D_{k2}(C)=M$$

$$D_{k2}(E_{k1}(M))=M$$

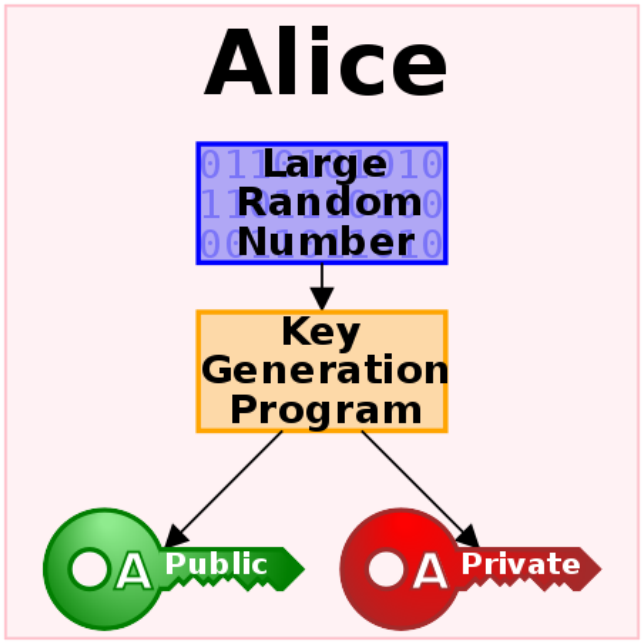
K1 = k2,　　对称加密算法
K1 <> k2　　非对称加密算法

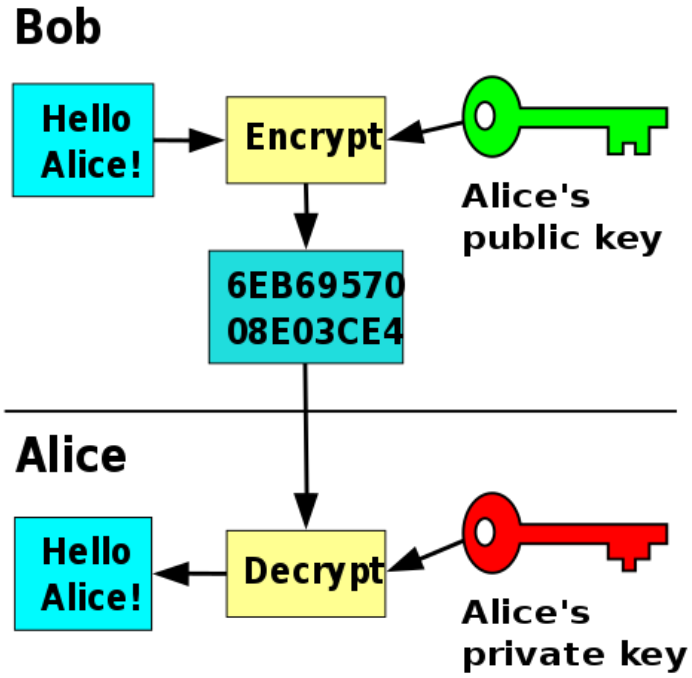
非对称加密算法

- 1970年，英国学者James H. Ellis提出设想
- 1976年，美国学者Whitfield Diffie and Martin Hellman首次提出一种可实现的非对称加密算法——exponentiation in a finite field

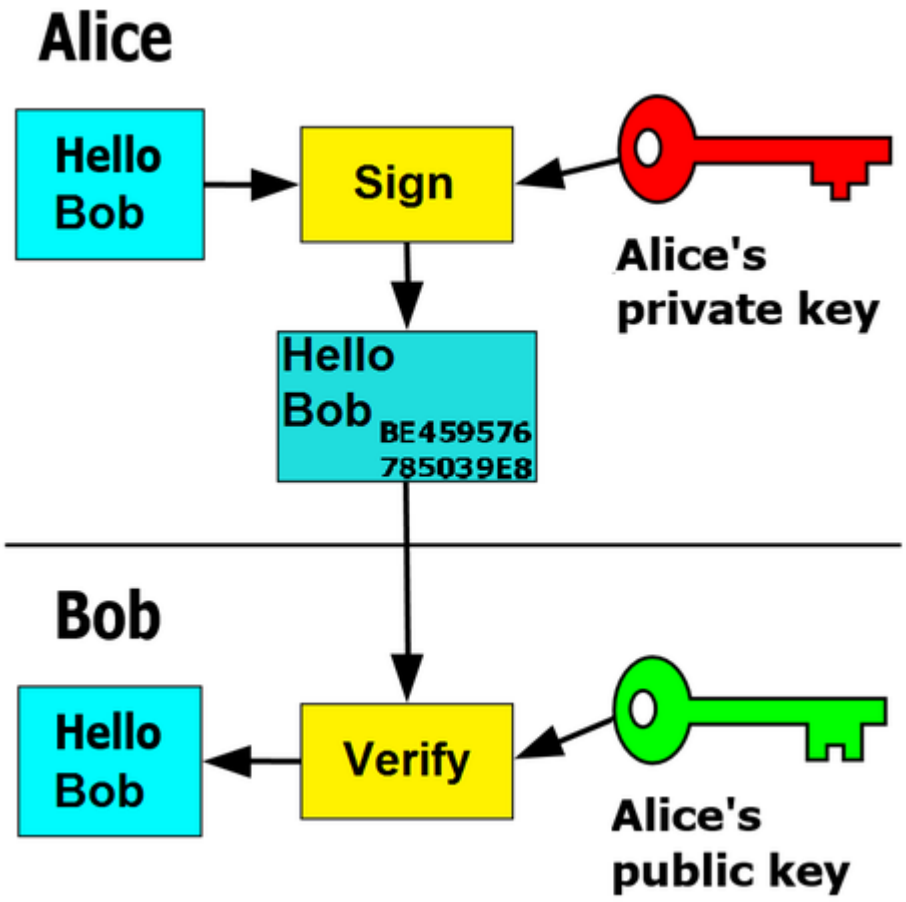


非对称加密算法


Alice
Large Random Number
Key Generation Program
Public
Private


Bob
Hello Alice!
Encrypt
Alice's public key
6EB69570 08E03CE4
Alice
Hello Alice!
Decrypt
Alice's private key

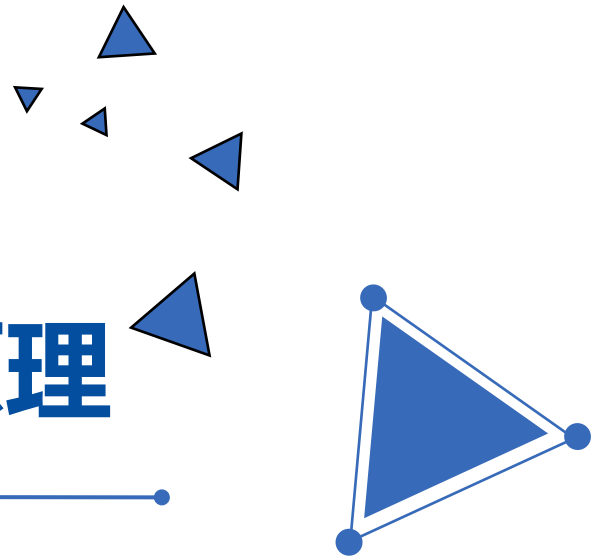
数字签名


Alice
Hello
Bob
Sign
Alice's
private key
Hello
Bob
BE459576
785039E8
Bob
Hello
Bob
Verify
Alice's
public key

非对称加密算法

- 基于大素数分解难题：
  - RSA
- 基于离散对数难解问题：
  - 椭圆曲线加密
  - Diffie-Hellman 加密

02 区块链技术原理



起源

- 中本聪(Satoshi Nakamoto)，2008
- 比特币:一种点对点的电子现金系统

Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System

Satoshi Nakamoto
satoshin@gmx.com
www.bitcoin.org

总共将发行2100万个比特币
目前已生成1800万个，目前市值约30000美元/个，总市场规模超5千亿美元。

迄今最成功的区块链应用:
14多年来没有出现过任何一次服务暂停
任何交易均可被追溯

Abstract. A purely peer-to-peer version of electronic cash would allow online payments to be sent directly from one party to another without going through a financial institution. Digital signatures provide part of the solution, but the main benefits are lost if a trusted third party is still required to prevent double-spending. We propose a solution to the double-spending problem using a peer-to-peer network. The network timestamps transactions by hashing them into an ongoing chain of hash-based proof-of-work, forming a record that cannot be changed without redoing the proof-of-work. The longest chain not only serves as proof of the sequence of events witnessed, but proof that it came from the largest pool of CPU power. As long as a majority of CPU power is controlled by nodes that are not cooperating to attack the network, they'll generate the longest chain and outpace attackers. The network itself requires minimal structure. Messages are broadcast on a best effort basis, and nodes can leave and rejoin the network at will, accepting the longest proof-of-work chain as proof of what happened while they were gone.

数字货币面临的2个问题

- **问题1：虚假货币**
  - 解决方案：数字签名（非对称加密技术）
- **问题2：多重支付**
  - 解决方案：分布式账本

分布式账本技术原理

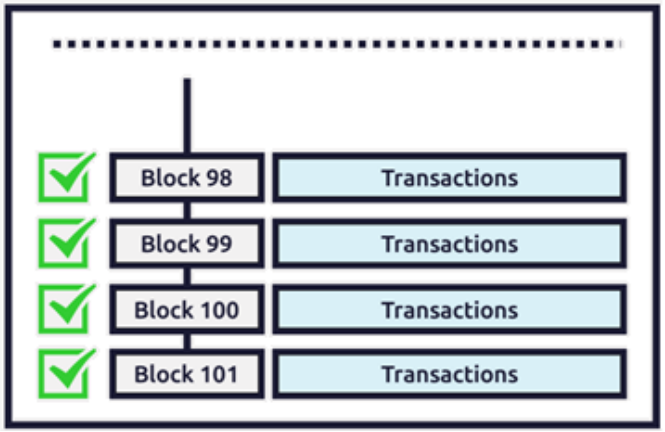
- 将交易向全网所有节点进行广播
- 众多记账节点对记账权达成共识，由共识确认的记账节点把记账区块发布给全网
- 所有账本数据完整存储于区块链网络的每个节点
- 所有节点都对账本数据的合法性和完整性进行验证

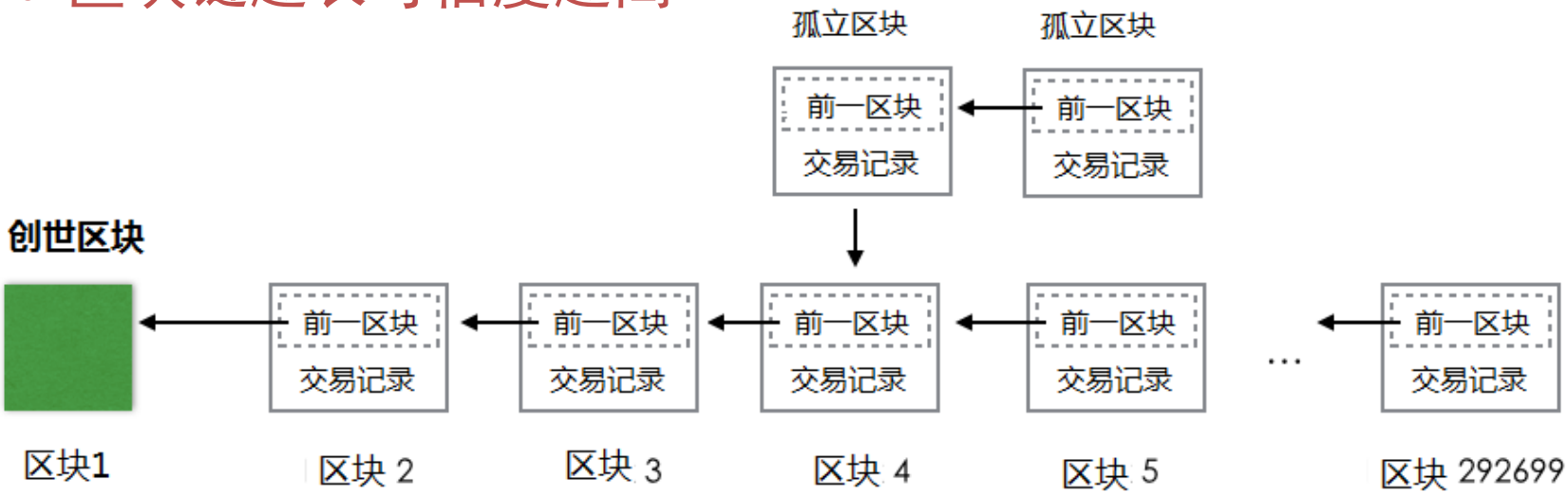
分布式账本技术原理

- 两个核心技术：
  - 以链式区块组织账本数据实现账本数据的不可篡改
  - 分布式的可信记账机制

区块链宏观结构

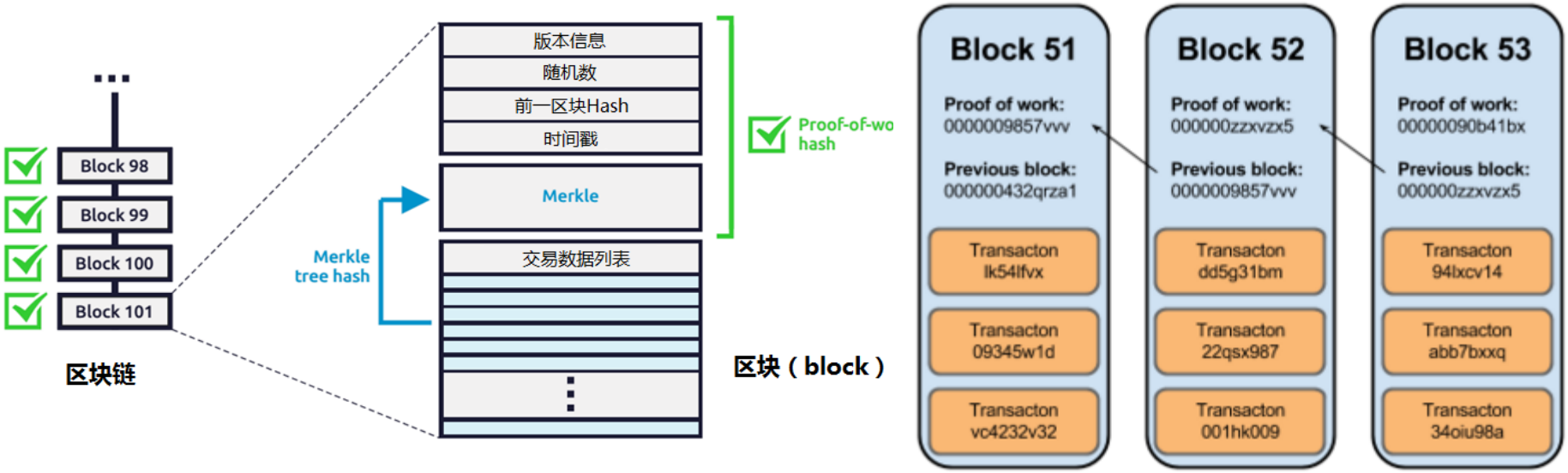
- **区块链**
  - 基于哈希值进行链接
- **特点**
  - 区块链中数据无法篡改或删除
  - 区块链越长可信度越高





区块的微观结构

- 每个区块包括区块头和交易数据两个部分
  - 区块头由当前区块的元数据和前一区块的Hash值构成
  - Merkle树用于对交易数据列表进行快速寻址



区块的微观结构

区块的结构

大小	字段	描述
4字节	区块大小	用字节表示的该字段之后的区块大小
80字节	区块头	组成区块头的几个字段
1-9 字节（可变整数）	交易计数器	交易的数量
可变的	交易	记录在区块里的交易信息

区块头的结构

大小	字段	描述
4字节	版本	版本号，用于跟踪软件/协议的更新
32字节	父区块哈希值	引用区块链中父区块的哈希值
32字节	Merkle根	该区块中交易的merkle树根的哈希值
4字节	时间戳	该区块产生的近似时间（精确到秒的Unix时间戳）
4字节	难度目标	该区块工作量证明算法的难度目标
4字节	Nonce	用于工作量证明算法的计数器

区块头代码

class CBlockHeader {} //这是一个“类”，或数据机构，内含下面这些字段：

] int32_t nVersion　　//所采用Bitcoin协议的版本号

] uint256 hashPrevBlock　　//上一个块的（块头）Hash值。

] uint256 hashMerkleRoot　　//所记载交易记录的TxID，

　　//即其Hash值所构成Merkle树的根

] uint32_t nTime　　//本块的发布时间

] uint32_t nBits　//为挖矿过程设置的难度，Hash值中须有的前导零的位数。

] uint32_t nNonce　　//在挖矿过程中使Hash值达到nBits字段所

　　//要求前导零位数的试凑值。

区块的微观结构

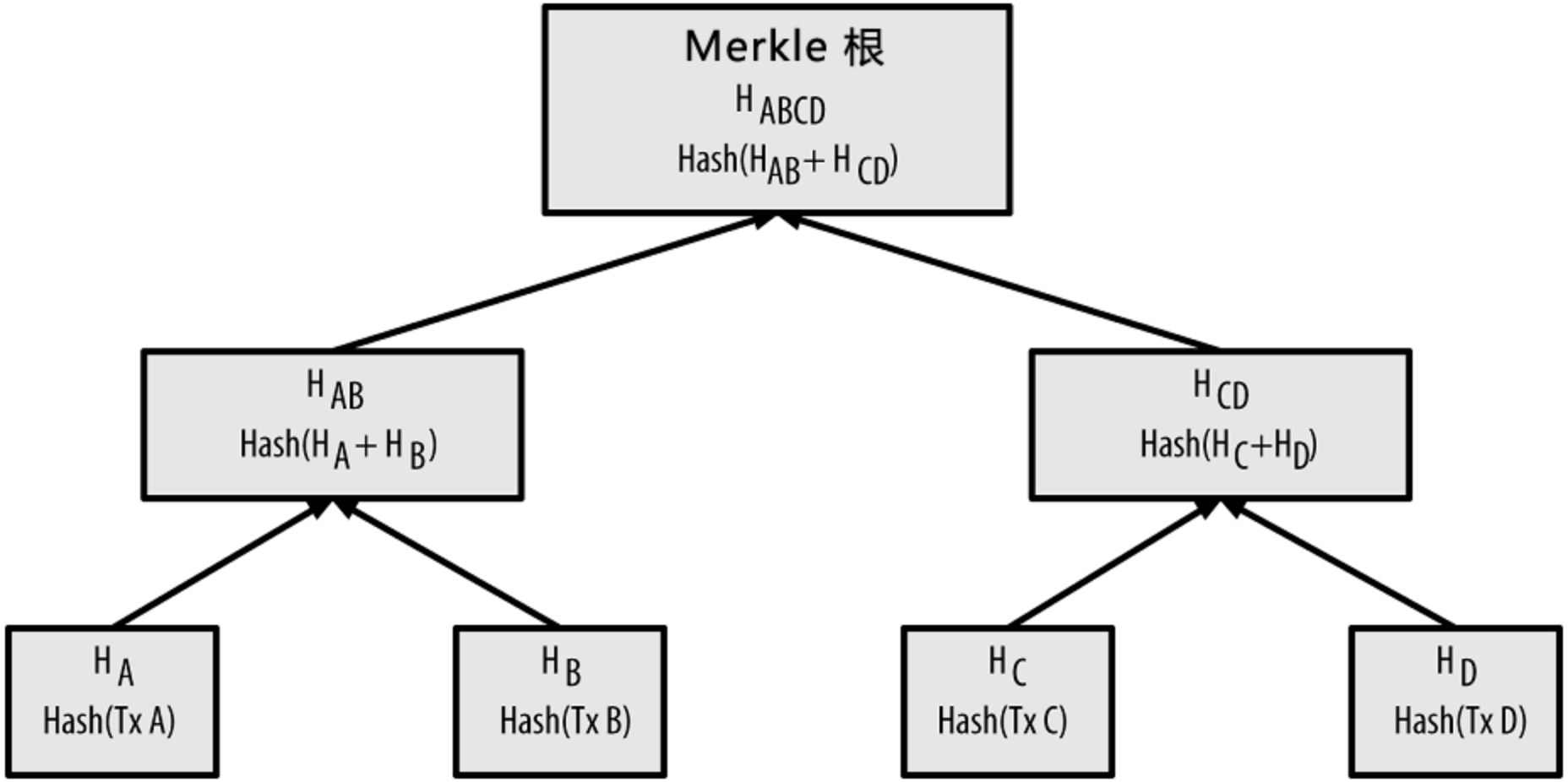
区块标识符：区块头哈希值和区块高度

- 区块主标识符是它的加密哈希值，一个通过SHA256算法对区块头进行二次哈希计算而得到的数字指纹。例如:000000000019d6689c085ae165831e934ff763ae46a2a6c172b3f1b60a8ce26f是第一个比特币区块的区块哈希值。
- 区块哈希值实际上并不包含在区块的数据结构
- 第二种识别区块的方式是通过该区块在区块链中的位置，即“区块高度（block height）”。例如：高度为0的区块就是创世区块。
- 和区块哈希值不同的是，区块高度并不是唯一的标识符，因为有可能出现区块链分叉。

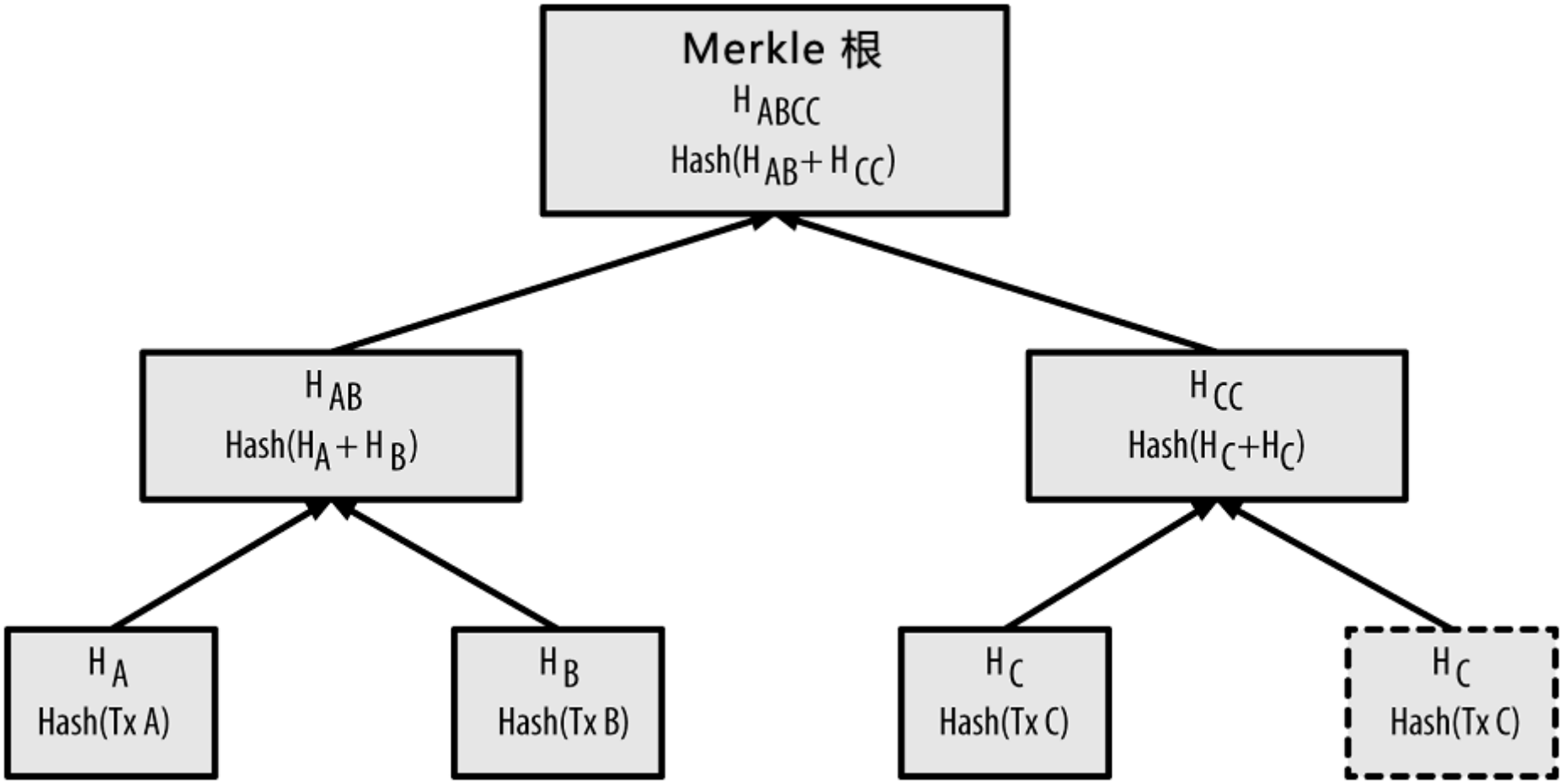
区块的微观结构：Merkle树

- Merkle树是一种哈希二叉树，它是一种用作快速归纳和校验大规模数据完整性的数据结构。这种二叉树包含加密哈希值。
  - 叶节点是数据块的哈希值。
  - 非叶节点的哈希值是根据它下面子节点的值哈希计算得到。
- 在比特币网络中，Merkle树被用来归纳一个区块中的所有交易，同时生成整个交易集合的数字指纹，且提供了一种校验区块是否存在某交易的高效途径。
- Merkle树中使用两次SHA256算法计算结点的哈希值。
  - H~A~ = SHA256(SHA256(交易A)) //两次SHA256是为了提高安全强度
- 当N个数据元素经过加密后插入Merkle树时，你至多计算log2(N)次就能检查出任意某数据元素是否在该树中，这使得该数据结构非常高效。

区块的微观结构：Merkle树



区块的微观结构：Merkle树



Merkle树

Ralph Merkle

Ralph Merkle was born in Berkeley, California, in 1952. He received his B.S. in computer science (1974) from UC Berkeley and an M.S. (1977) and Ph.D. in electrical engineering from Stanford University (1979).

As an undergraduate in 1974, Merkle discovered a general method of securing electronic communications using a system of cryptographic key exchange now known as Merkle's Puzzles. Unfortunately, the idea was met with disinterest by his professors, and languished until Merkle learned about Martin Hellman and Whitfield Diffie at Stanford.

Merkle joined the team at Stanford for a summer in 1976 and became a doctoral candidate under Hellman the following fall. Working with Diffie and Hellman, Merkle developed the world's earliest public key cryptographic system. Their insight underpins secure transactions on the Internet, enabling e-commerce and a host of other interactions in which secure electronic communications are required.

On graduation, Merkle worked for Elxsi, a small computer company in Silicon Valley. Since 1988, Merkle has been researching nanotechnology and, in 2003, became a distinguished professor at Georgia Tech before returning to California in 2006.

He has been awarded the RSA Award in Mathematics (2000) and the IEEE Richard W. Hamming Medal (2010).

Merkle树的价值

- **快速比较大量数据：**当两个Merkle树的根哈希值相同时，说明所代表的的数据都相同。
- 快速定位修改：如果其中某个交易（数据）发生修改，从根向下可以快速定位被修改的数据。
- 快速验证其中数据：要验证某个交易（数据）是否在Merkle树中，只需要提供一条从该交易的叶节点开始的路径，经过hash计算比对后即可验证。

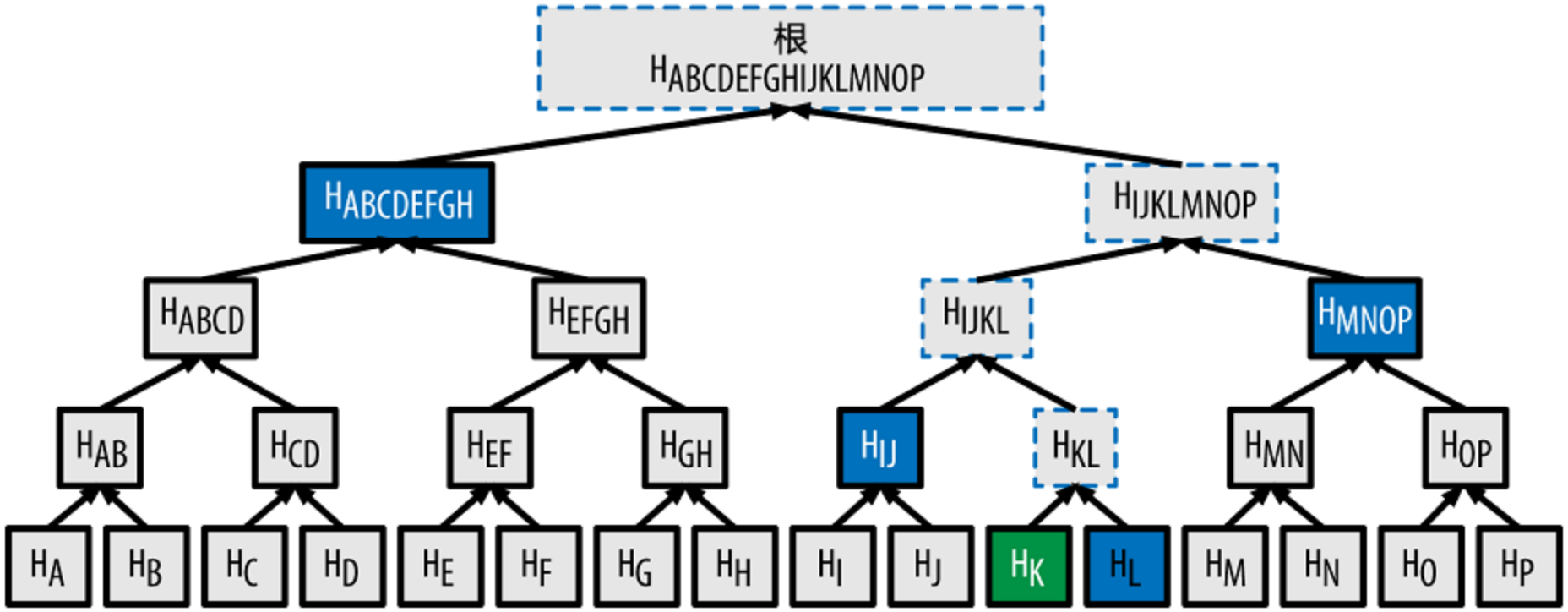
比特币区块链中的节点

- 全节点 full client：存储着整个区块链，承但对交易请求进行验证和执行，可以通过挖矿争取发布区块，还承担着应别的节点之请向其发送区块和相关交易信息的义务，同时也承担转发交易请求和区块的义务。
  - 矿工节点
  - 非矿工节点
- 轻节点 light client
  - 简单支付验证（SPV）节点
    - 只存储区块头，不存储区块块体，仍可以对到来的交易请求进行验证。
  - 钱包
    - 一个连接区块链的应用软件(app)，记录与所有者有关的信息：区块链地址、私钥、账户余额、UTXO等，不存储账本。

SPV（钱包）验证过程

- 针对某个支付到自己比特币地址的交易建立布隆过滤器，限制只接收含有目标比特币地址的交易。
- 其他全节点探测到某个交易符合SPV节点设置的布隆过滤器条件时，以**Merkleblock**消息的形式发送该区块，Merkleblock消息包含区块头和一条连接目标交易与Merkle根的Merkle路径。
- 交易的存在性验证：SPV节点通过该Merkle路径找到跟该交易相关的区块，并验证对应区块中是否存在目标交易（**Merkle Path Proof**）。
- 交易是否双化验证：SPV节点检查这笔交易所在区块之后的区块个数，区块个数越多说明该区块被全网更多节点共识，一般来说，一笔交易所属区块之后的区块个数达到**6个**时，说明这笔交易是可信的。

区块的微观结构：Merkle树



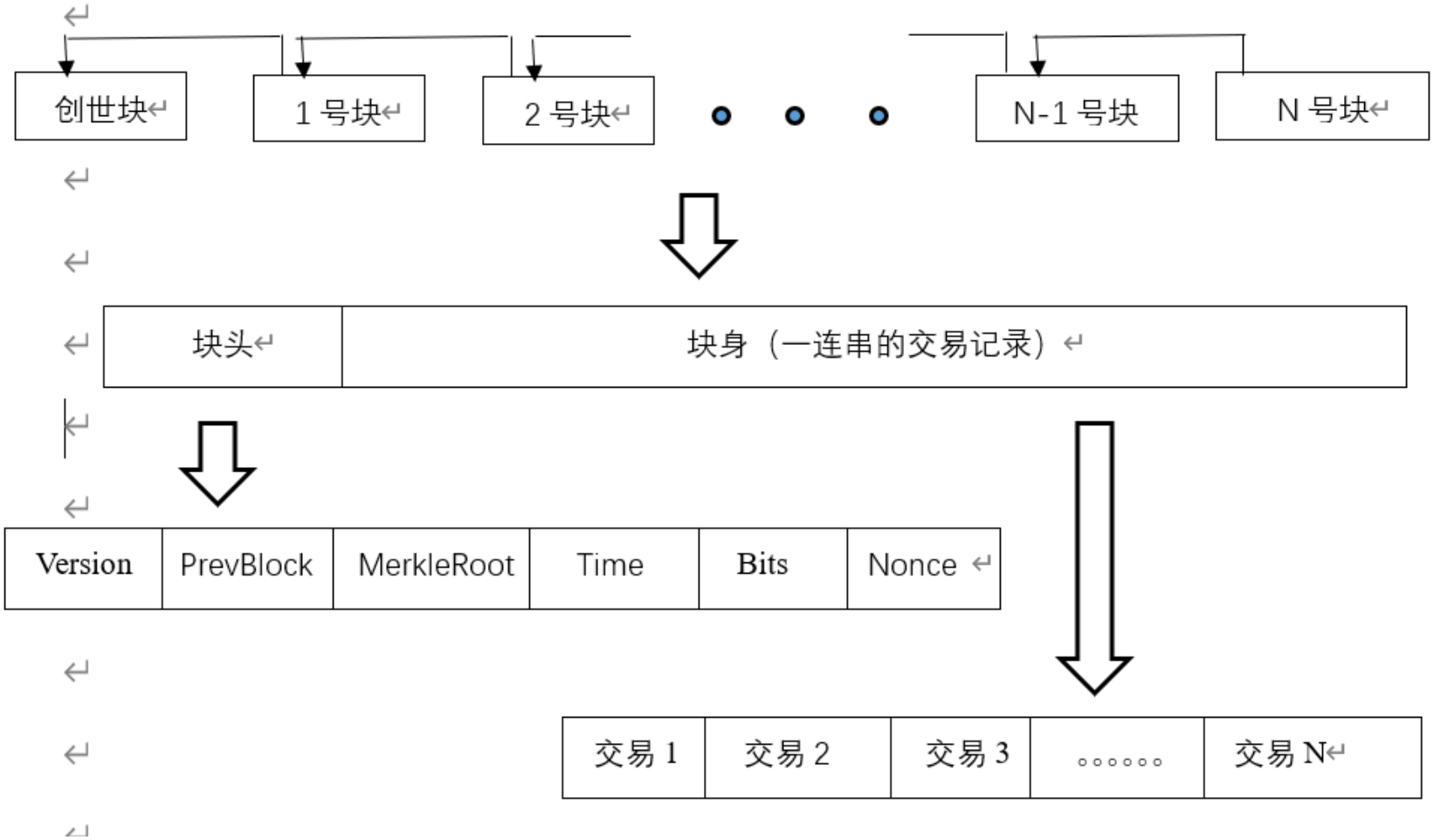
Merkle树的价值：简单支付验证

交易数量	区块的近似大小	路径大小（哈希数量）	路径大小（字节）
16笔交易	4KB	4个哈希	128字节
512笔交易	128KB	9个哈希	288字节
2048笔交易	512KB	11个哈希	352字节
65,535笔交易	16MB	16个哈希	512字节

有了Merkle树，一个节点能够仅下载区块头（80字节/区块），然后通过从一个满节点回溯一条Merkle路径就能认证一笔交易的存在，而不需要存储或者传输区块链中大多数内容。

这种不需要维护一条完整区块链的节点，又被称作简单支付验证（SPV）节点，它不需要下载整个区块而通过Merkle路径去验证交易的存在。

区块链整体结构


创世块
1 号块
2 号块
N-1 号块
N 号块
块头
块身（一连串的交易记录）
Version
PrevBlock
MerkleRoot
Time
Bits
Nonce
交易 1
交易 2
交易 3
。。。。。。
交易 N

区块链整体结构

```
class CBlock : public CBlockHeader {}
] std::vector<CTransactionRef> vtx      //这个字段的内容会被发送并写入磁盘。
] mutable bool fChecked      //memory only，这个字段的内容只存在于内存中。
                             //mutable 表示可更改。
```

区块头代码

class CBlockHeader {} //这是一个“类”，或数据机构，内含下面这些字段：

] int32_t nVersion //所采用Bitcoin协议的版本号

] uint256 hashPrevBlock //上一个块的（块头）Hash值。

] uint256 hashMerkleRoot //所记载交易记录的TxID，
//即其Hash值所构成Merkle树的根

] uint32_t nTime //本块的发布时间

] uint32_t nBits //为挖矿过程设置的难度，Hash值中须有的前导零的位数。

] uint32_t nNonce //在挖矿过程中使Hash值达到nBits字段所
//要求前导零位数的试凑值。

交易的数据结构

class **CTransaction** {}　//一个交易请求或交易记录

] const std::vector<CTxIn> vin　　//本Tx的输入UTXO序列，即资金来源。

] const std::vector<CTxOut> vout　　//本Tx的输出UTXO序列，即资金去向。

] const int32_t　nVersion　　// CURRENT_VERSION=2

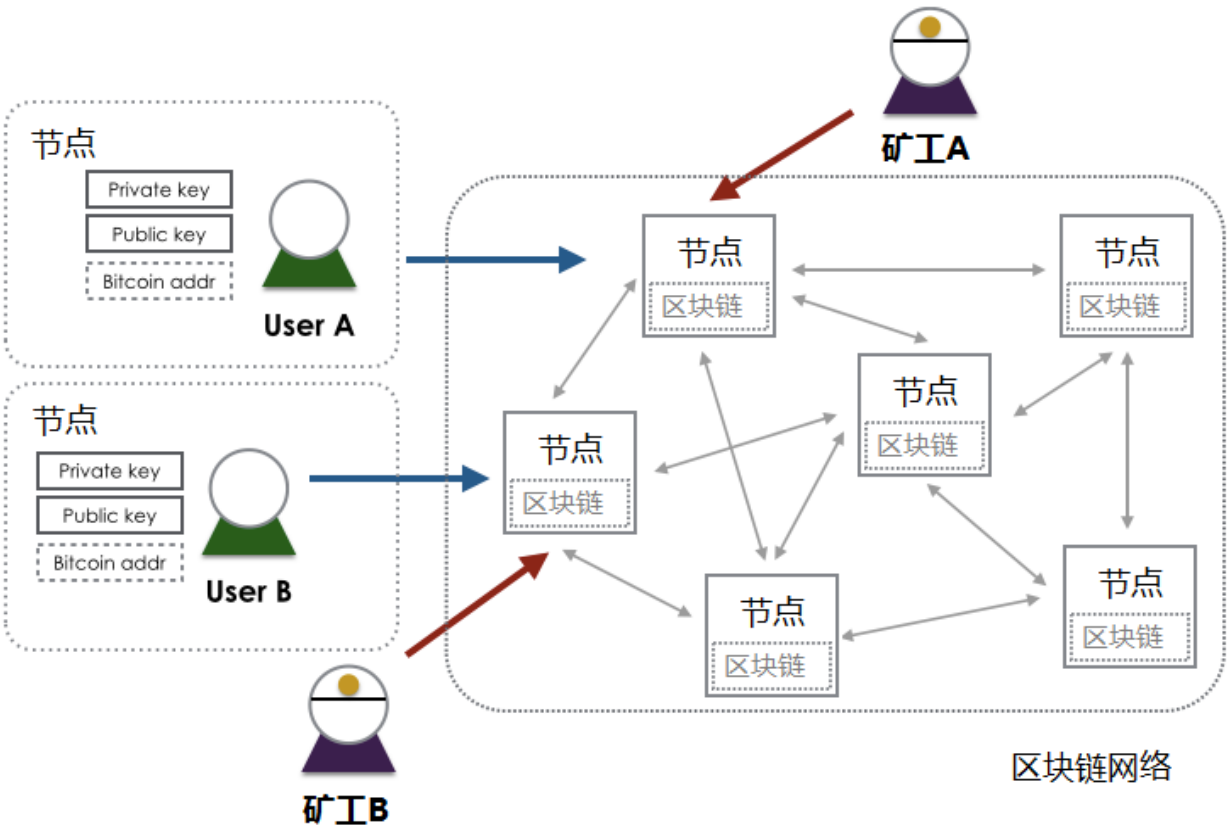
] const uint32_t　nLockTime　　//锁定时间，时间未到点之前本交易不入块。

] const uint256　hash　　//本Tx的Hash值，只存储在内存中，
//不作永久存储也不发送。

分布式账本技术原理

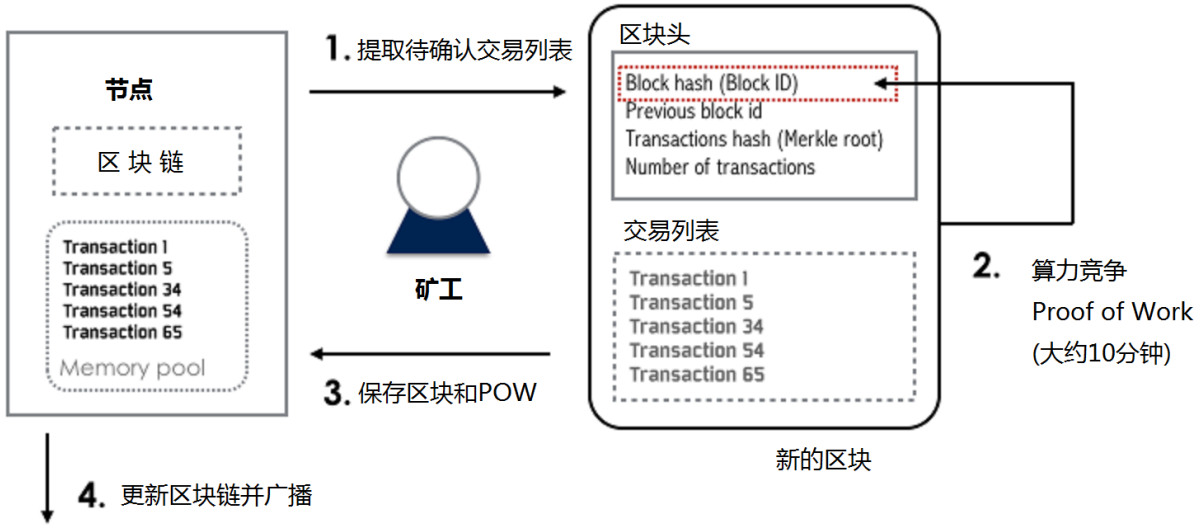
- 两个核心技术：
  - 以链式区块组织账本数据实现账本数据的不可篡改
  - 分布式的可信记账机制

共识机制：由谁记账


节点
Private key
Public key
Bitcoin addr
User A
节点
Private key
Public key
Bitcoin addr
User B
矿工B
矿工A
节点
区块链
节点
区块链
节点
区块链
节点
区块链
节点
区块链
节点
区块链
区块链网络

共识机制：由谁记账

- **目的：**
  - 解决记账权
- **场景：**
  - **开放系统，动态增减，海量节点**
- **解决方案**
  - 工作量证明（proof of work）：高强度哈希计算(SHA256)进行算力竞争解决记账权，达成共识。



拜占庭将军问题（分布式一致性）

1982年Leslie Lamport（2013年的图灵奖得主）与Robert Shostak联名发表了《Byzantine Generals Problem》，对拜占庭将军问题作了完整的阐述。

1. 每个将军控制自己的军队
2. 通过信使给其他将军传递消息
3. 将军中可能有叛徒
4. 信使是可靠的，但可能被截获

1. 每个分布式节点独立运行
2. 相互间可通过网络通信
3. 可能存在恶意节点
4. 信道是可靠的，但可能中断

拜占庭将军问题算法的目标：

1. 一致性：所有忠诚的将军按照相同的计划行动
2. 正确性：少数叛徒不能导致忠诚将军采取错误的行动计划

分布式系统模型

- 时序模型：
  - 同步：分布式节点进程执行时间有确定的上限
  - 异步：进程执行时间没有上限
- 故障模型
  - 崩溃故障：节点崩溃或联系不上
  - 拜占庭故障：节点崩溃、联系不上、恶意行为
- 容错模型：
  - 崩溃容错 CFT(Crash Fault Tolerance)
  - 拜占庭容错 BFT(Byzantine Fault Tolerance)

拜占庭将军问题（分布式一致性）

- 1982年Leslie Lamport（2013年的图灵奖得主）与Robert Shostak联名发表了《Byzantine Generals Problem》，对拜占庭将军算法作了完整的阐述。
- 1989年，Lamport又提出了一个“Paxos算法”，又称“Paxos规程（Paxos Protocol）”。
- 1998年，Lamport在一篇论文《The Part-Time Parliament》中对这个算法作了系统的阐述并提供了数学证明。
- 2001年，Lamport发表了《Paxos Made Simple》进一步加以解释，但人们认为还是太复杂。
- 1999年，Miguel Castro和Barbara Liskov（2008年图灵奖得主）联名发表了《实用拜占庭容错（Practical Byzantine Fault Tolerance）》一文，提出了一个PBFT算法。
- 2014年，斯坦福大学的Diego Ongaro & John Ousterhout又发表了《寻找可理解的共识算法（In Search of an Understandble Consensus Algorithm）》一文，提出了一个称为RAFT的算法。
- PBFT和RAFT算法都是在区块链中常用的共识算法，但不是在彻底去中心化的公有链中。这两种算法有个共性，就是“委员会”中都有个类似于主持人那样的“领导者（Leader）”或“主导者（Prime）”的角色。

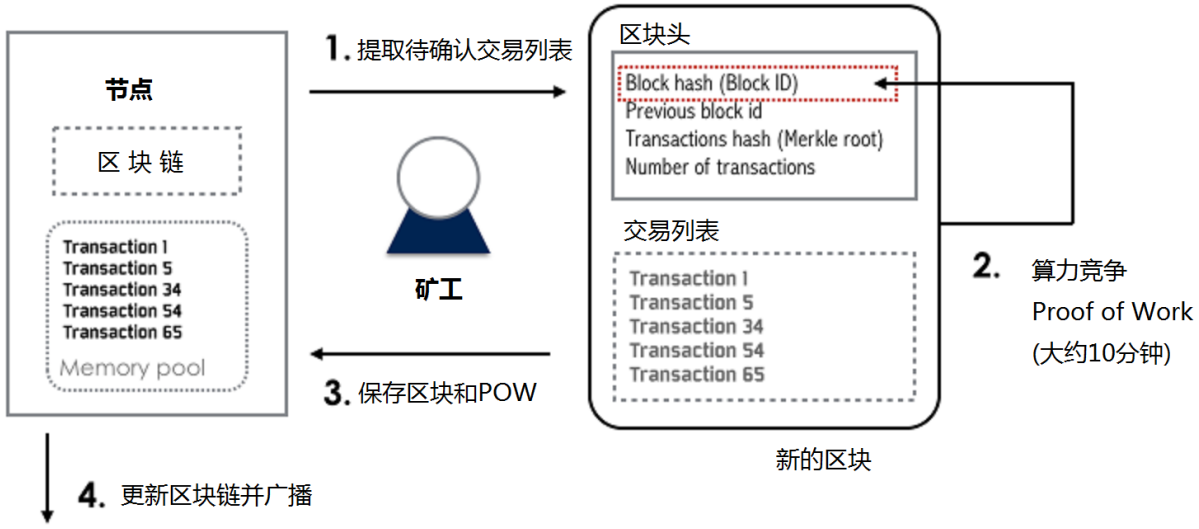
比特币区块链共识协议模型

- 节点海量、动态增减
- 存在恶意节点
- PBFT算法要求节点集相对稳定，数量有限，不适用

- 工作量证明PoW共识
  - 划定固定时间段（10分钟）
  - 相同或相似输入数据（组装的区块）
  - 算力竞争选出获胜节点，其它节点验证结果后不再发送消息
  - 最长链原则，从短期共识扩展到长期共识

共识机制：由谁记账

- **目的：**
  - 解决记账权
- **场景：**
  - **开放系统，动态增减，海量节点**
- **解决方案**
  - 工作量证明（proof of work）：高强度哈希计算(SHA256)进行算力竞争解决记账权，达成共识。



SHA256算力竞争

- I am Satoshi Nakamoto0 => a80a81401765c8eddee25df36728d732...
- I am Satoshi Nakamoto1 => f7bc9a6304a4647bb41241a677b5345f...
- I am Satoshi Nakamoto2 => ea758a8134b115298a1583ffb80ae629...
- I am Satoshi Nakamoto3 => bfa9779618ff072c903d773de30c99bd...
- I am Satoshi Nakamoto4 => bce8564de9a83c18c31944a66bde992f...
- I am Satoshi Nakamoto5 => eb362c3cf3479be0a97a20163589038e...
- I am Satoshi Nakamoto6 => 4a2fd48e3be420d0d28e202360cfbaba...
- I am Satoshi Nakamoto7 => 790b5a1349a5f2b909bf74d0d166b17a...
- I am Satoshi Nakamoto8 => 702c45e5b15aa54b625d68dd947f1597...
- I am Satoshi Nakamoto9 => 7007cf7dd40f5e933cd89fff5b791ff0...
- I am Satoshi Nakamoto10 => c2f38c81992f4614206a21537bd634a...
- I am Satoshi Nakamoto11 => 7045da6ed8a914690f087690e1e8d66...
- I am Satoshi Nakamoto12 => 60f01db30c1a0d4cbce2b4b22e88b9b...
- I am Satoshi Nakamoto13 => 0ebc56d59a34f5082aaef3d66b37a66...
- I am Satoshi Nakamoto14 => 27ead1ca85da66981fd9da01a8c6816...
- I am Satoshi Nakamoto15 => 394809fb809c5f83ce97ab554a2812c...
- I am Satoshi Nakamoto16 => 8fa4992219df33f50834465d3047429...
- I am Satoshi Nakamoto17 => dca9b8b4f8d8e1521fa4eaa46f4f0cd...
- I am Satoshi Nakamoto18 => 9989a401b2a3a318b01e9ca9a22b0f3...
- I am Satoshi Nakamoto19 => cda56022ecb5b67b2bc93a2d764e75f...

区块头代码

class CBlockHeader {} //这是一个“类”，或数据机构，内含下面这些字段：

] int32_t nVersion //所采用Bitcoin协议的版本号

] uint256 hashPrevBlock //上一个块的（块头）Hash值。

] uint256 hashMerkleRoot //所记载交易记录的TxID，

//即其Hash值所构成Merkle树的根

] uint32_t nTime //本块的发布时间

] uint32_t nBits //为挖矿过程设置的难度，Hash值中须有的前导零的位数。

] uint32_t nNonce //在挖矿过程中使Hash值达到nBits字段所

//要求前导零位数的试凑值。

工作量证明

```
25        //不断变更区块头中的随机数 Nonce
26        //对变更后的区块头做双重SHA256哈希运算
27        //CheckProofOfWork 函数 与当前难度的目标值做比对，如果小于目标难度，即Pow完成
28        //uint64_t nMaxTries = 1000000;即重试100万次<br>
29          while (nMaxTries > 0 && pblock->nNonce < nInnerLoopCount && !<strong>CheckProofOfWork(</strong>pb
30              ++pblock->nNonce;
31              --nMaxTries;
32          }
```

CheckProofofWork()的输入：

- 本区块头计算得到的hash值（256位）
- 难度值：nBits

- 如果本次SHA256不成功，nNonce加1，继续尝试

工作量证明

```
1  bool CheckProofOfWork(uint256 hash, unsigned int nBits, const Consensus::Params& params)
2  {
3      bool fNegative;
4      bool fOverflow;
5      arith_uint256 bnTarget;
6
7      bnTarget.SetCompact(nBits, &fNegative, &fOverflow);
8
9      // Check range
10     if (fNegative || bnTarget == 0 || fOverflow || bnTarget > UintToArith256(params.powLimit))
11         return false;
12
13     // Check proof of work matches claimed amount
14     if (UintToArith256(hash) > bnTarget)
15         return false;
16
17     return true;
18 }
```

工作量证明的难度设定和调整

- New Difficulty = Old Difficulty * (Actual Time of Last 2016 Blocks / 20160 minutes)

- 例如：
  - target =0x00000000000003A30C0000000000000000000000000000000000000000000000

- 在每个完整节点中独立自动发生的。每2,016个区块中的所有节点都会调整难度。难度的调整公式是由最新2,016个区块的花费时长与20,160分钟（两周，即这些区块以10分钟一个速率所期望花费的时长）比较得出的。难度是根据实际时长与期望时长的比值进行相应调整的（或变难或变易）。简单来说，如果网络发现区块产生速率比10分钟要快时会增加难度。如果发现比10分钟慢时则降低难度。

作业1

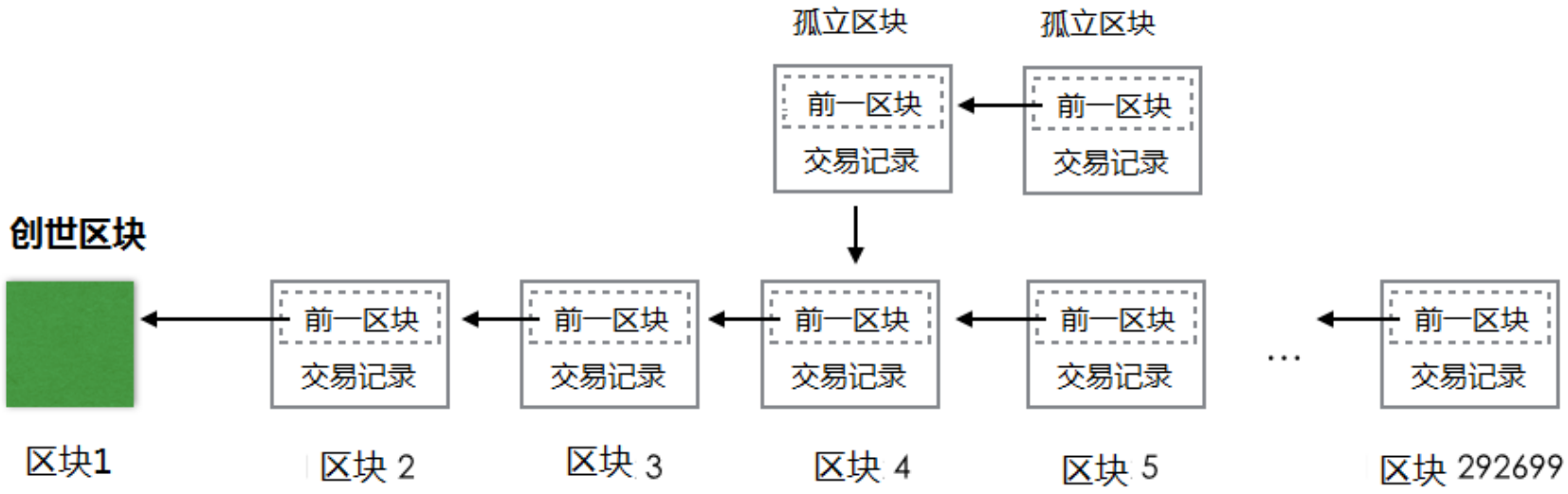
- 给定字符串“Blockchain@ZhejiangUniversity”，后面添加nonce，提交一个SHA256的代码实现，实验说明SHA256找到一个前30、31、32位（二进制）为0的数时的nonce值和计算时间。
- 提交格式：word文件
- 文件名：姓名+学号+作业1.docx
- 提交邮箱：22221263@zju.edu.cn
- 提交截止日期：2023年9月29日8点

区块生成和组装

- 竞争胜出的节点创建区块并广播
- 其他独立节点校验新区块
- 区块链的组装和选择（根据父区块hash值查找父区块）
  - 连接到主链上
  - 分叉（备用链）
  - 孤立区块

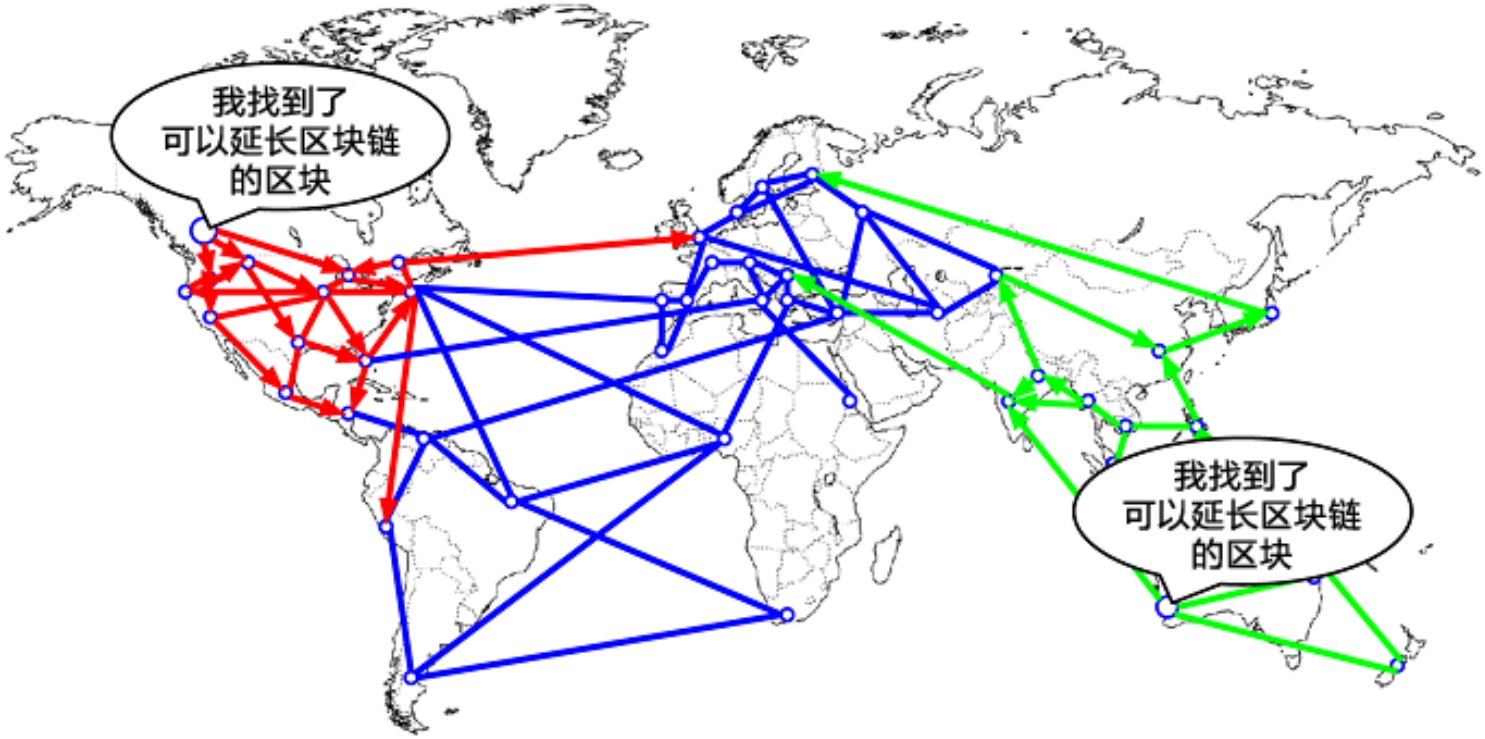
区块链分叉解决方案

- 把当前同一个父区块下的若干有效子区块都记录，形成兄弟区块（产生分叉）
- 后续区块（第3代、第4代……）到达后，依次加在前序区块后，若没有其他竞争性区块，这一分支最长，成为主链。

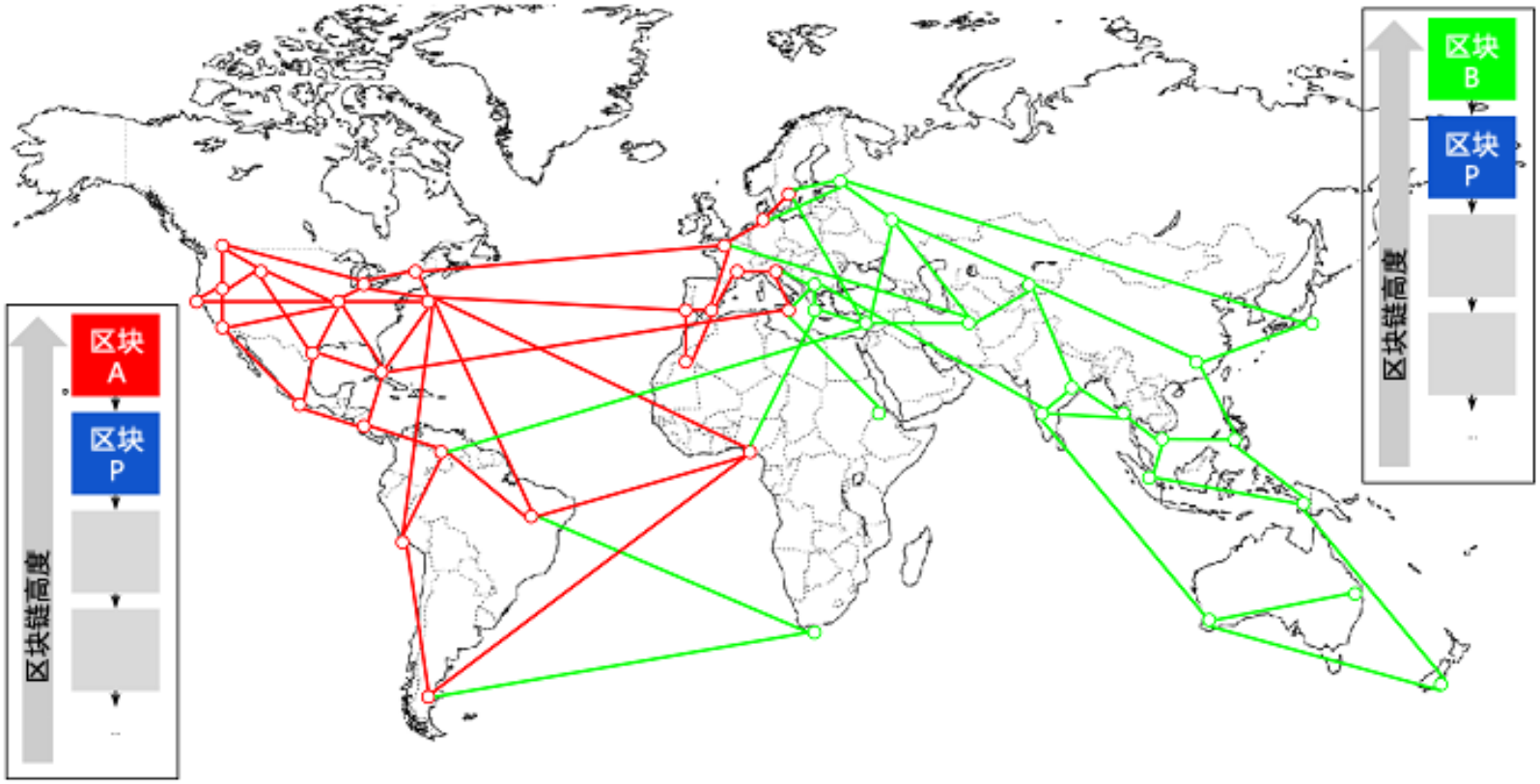


区块链分叉

区块链分叉



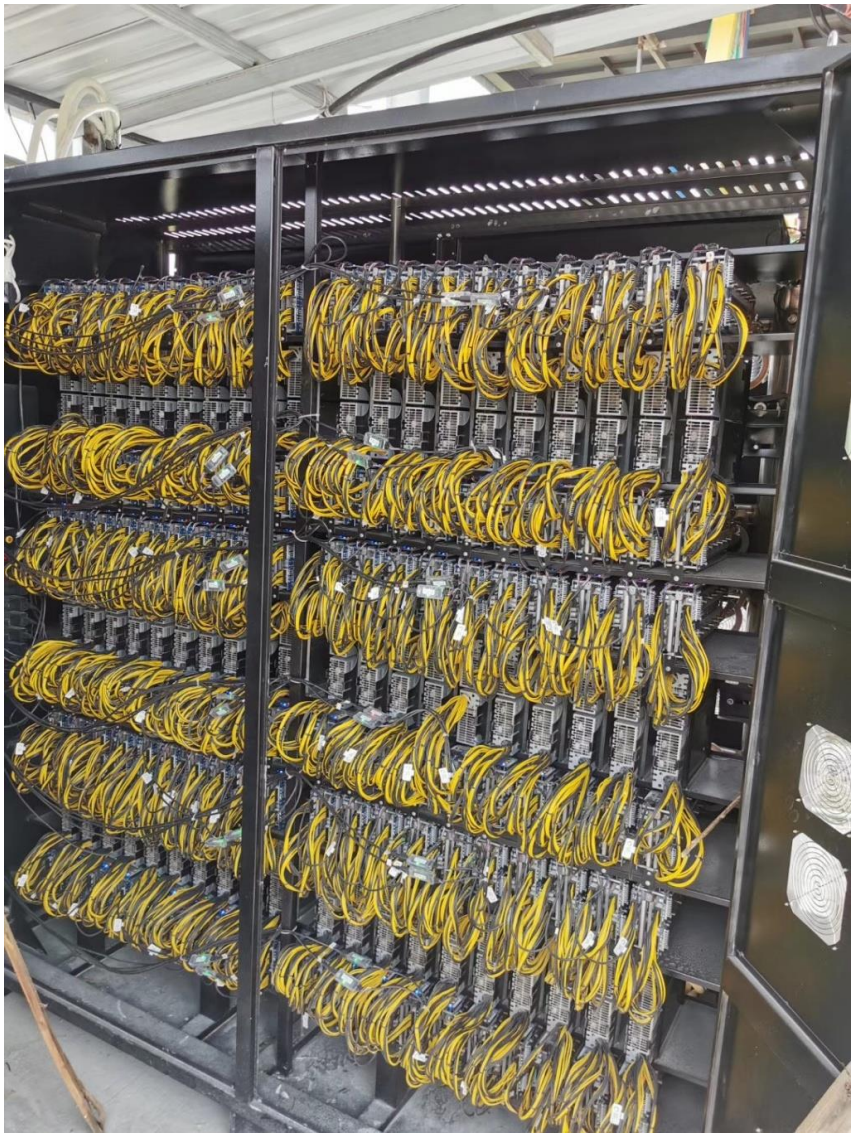
区块链分叉



挖矿：比特币的产生

- 挖矿节点必须有钱包功能
  - 有自己的160位密码地址、私钥
- 打包生成区块时，区块中额外加一个交易coinbase
  - 生成一个UTXO，包含当前奖励数量的比特币（现在是6.25）
  - 这个UTXO的招领地址是自己的地址
  - 如果记账成功，这个coinbase交易就生效，否则不在链上。

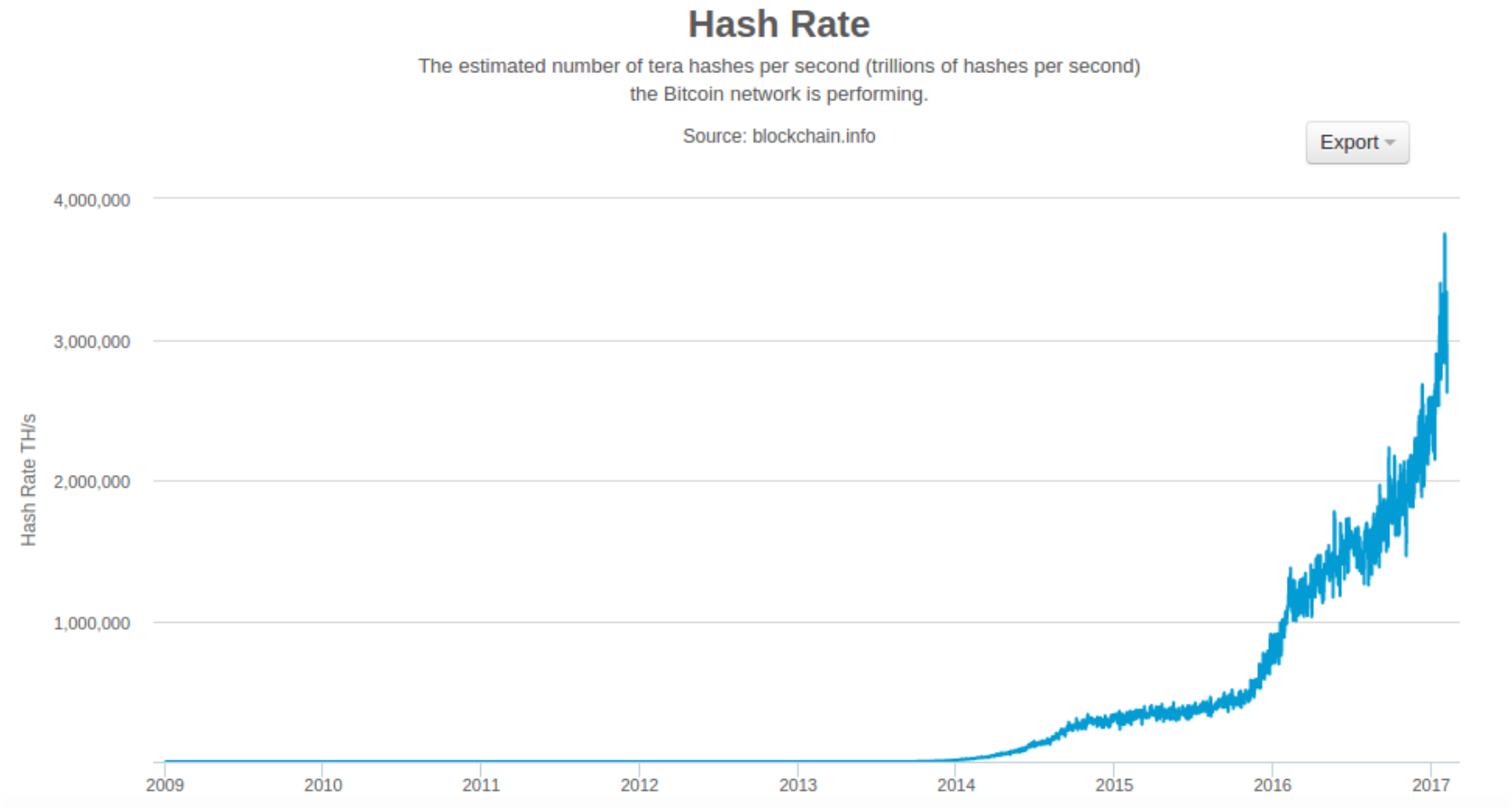
挖矿



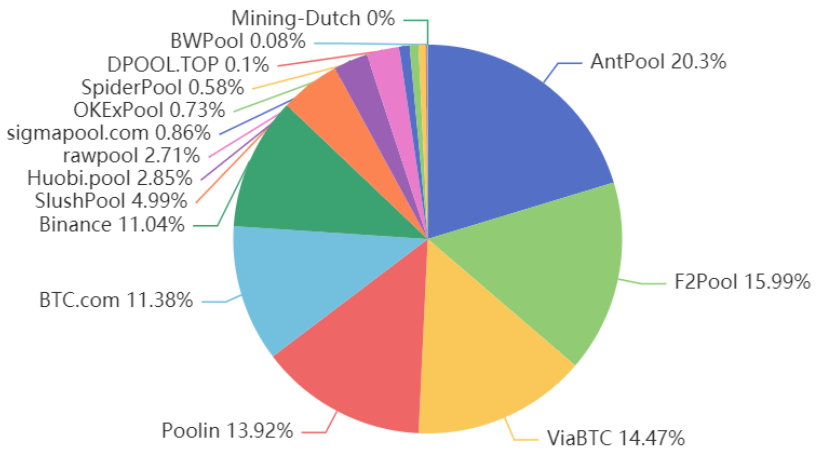
挖矿：算力竞争

- 2009 0.5 MH/sec－8 MH/sec （16× growth）
- 2010 8 MH/sec－116 GH/sec （14,500× growth）
- 2011 16 GH/sec－9 TH/sec （562× growth）
- 2012 9 TH/sec－23 TH/sec （2.5× growth）
- 2013 23 TH/sec－10 PH/sec （450× growth）
- 2014 10 PH/sec－300 PH/sec （3000× growth）
- 2015 300 PH/sec-800 PH/sec （266× growth）
- 2016 800 PH/sec-2.5 EH/sec （312× growth））

挖矿：算力竞争


Hash Rate
The estimated number of tera hashes per second (trillions of hashes per second) the Bitcoin network is performing.
Source: blockchain.info
Export
Hash Rate TH/s
4,000,000
3,000,000
2,000,000
1,000,000
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017

比特币矿池实时算力分布图

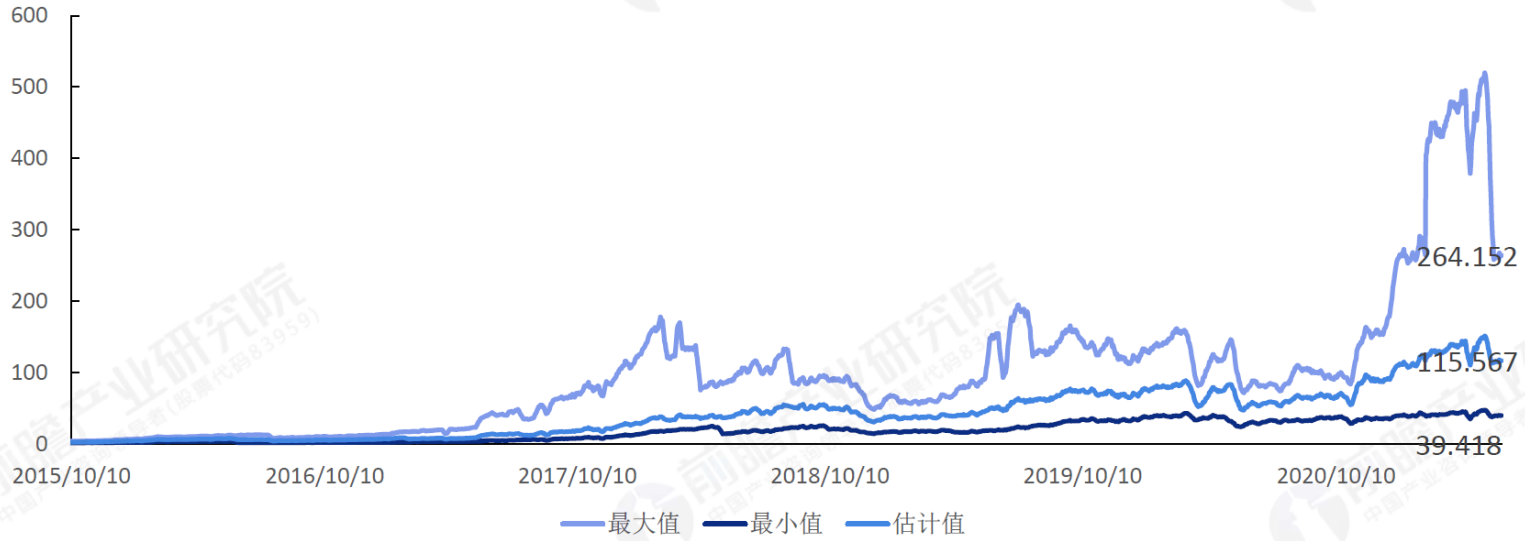


比特币BTC(Bitcoin)全网实时状态

实时价格	$47149.64 -1.60%	24H链上交易量	฿ 1909920
全网算力	127.76EH/S -3.41%	当前流通量	18801743.75
全网难度	17.62T +13.24% 2021-08-25	下次难度	19.04T +8.12% 2021-09-08
单位算力收益	0.00000714 BTC/T	最佳手续费	0.00007141 /KB
未确认交易数	645	未确认交易大小	0.11 MB
24H平均区块奖励	6.34455574	24H交易速率	2.83 笔/秒
下次减半时间	2024-02-27	发行时间	2011-10-07

剑桥大学推出了对比特币网络实时运行所需能源的实时数据，该在线工具名为“剑桥比特币电力消耗指数”（CBECI）。根据剑桥大学另类金融中心测算，在模型默认条件下，2021年6月6日，比特币的实时全网功率约为13.81吉瓦，年耗电量约116.24TWh。2020年，我国全社会用电量为7511TWh，我国用电量约占全球的28%，因此，由比特币供应带来的年耗电量占全球年用电量的0.43%。

2015-2021年比特币年用电量估算（单位：TWh）



注：不同模型之间比特币用电量会产生巨大差异，图表中数据为在模型默认条件下比特币年用电量估算。

中国告别比特币挖矿

21
05月

星期五

05月21日 22:14

国务院金融稳定发展委员会：打击比特币挖矿和交易行为

火星财经消息，据中国政府网报道，国务院金融稳定发展委员会：打击比特币挖矿和交易行为，坚决防范个体风险向社会领域传递。

利好39　　利空766

免责声明：作为区块链信息平台，本站所提供的资讯信息不代表任何投资暗示，本站所发布文章仅代表个人观点，与火星财经官方立场无关。鉴于中国尚未出台数字资产相关政策及法规，请中国大陆用户谨慎进行数字货币投资。

共识记账机制小结

- 每个全节点依据综合标准对每个交易进行独立验证
- 通过完成工作量证明算法的验算，挖矿节点将交易记录独立打包进新区块，
- 每个节点独立地对新区块进行校验并组装进区块链
- 每个节点对区块链进行独立选择，在工作量证明机制下选择累计工作量最大的区块链

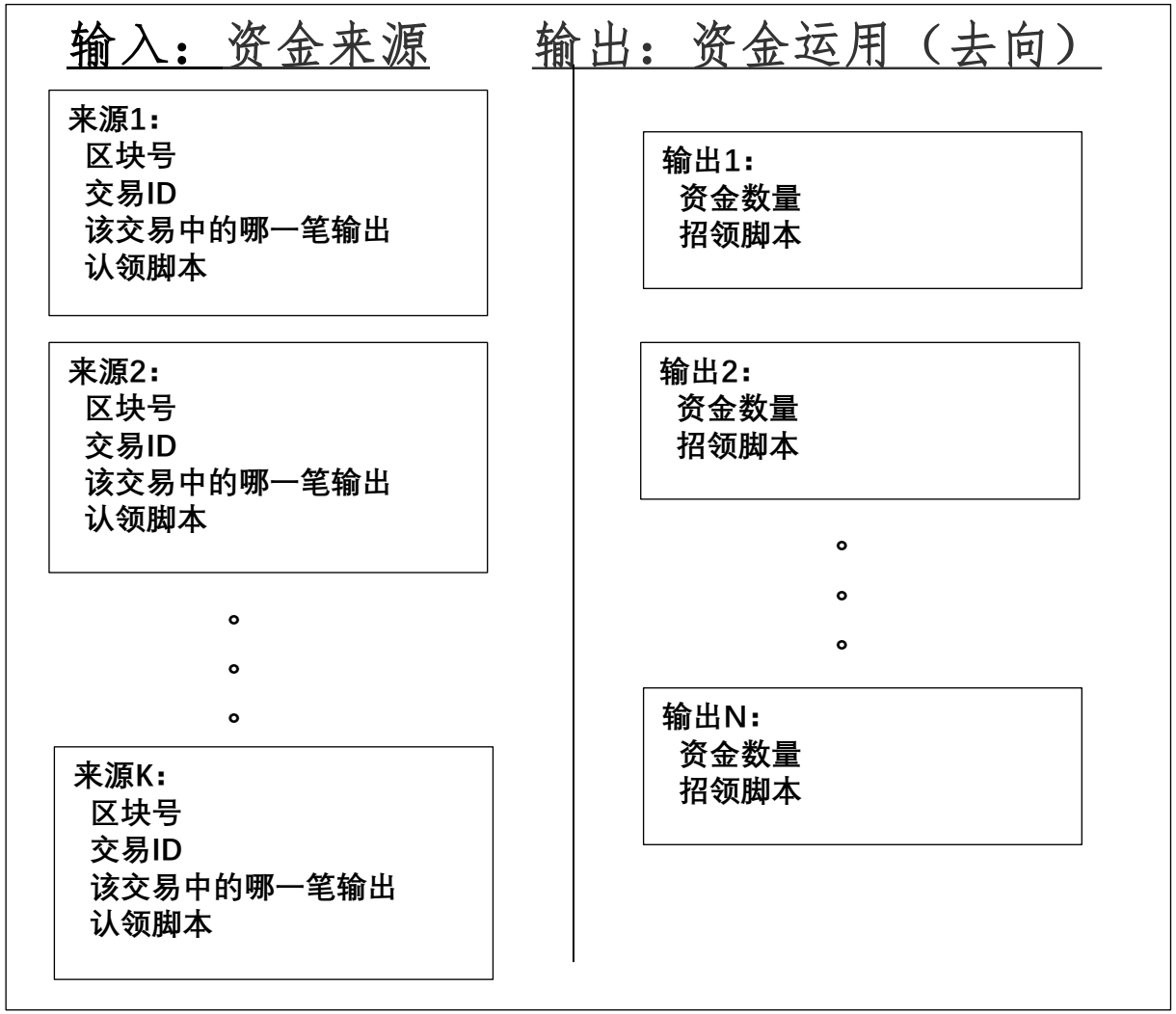
UTXO模型

- 每个比特币用户有一个160位（20字节）长度的地址，产生的过程：
  - 用户生产一对非对称密钥
  - 公钥经hash计算（SHA160）产生160位的地址
  - 私钥自己保存，用于数字签名
- 这个160位地址，是用户在比特币网络中交易的唯一标识。
- 与一般的银行账户模型不同，比特币不维护每个账户的资金余额，而是采用一种称为UTXO的模型。

UTXO模型

- UTXO（Unspent Transaction Output），未花费的交易输出
- 比特币中有两类交易：
  - 常规交易，有交易输入（支付者地址和金额）、交易输出（收入者地址和金额）
  - 挖矿交易（Coinbase），产生比特币，只有交易输出（挖矿者地址和金额）
- 每个地址的资金余额就是散布在账本中所有UTXO的总和，使用时把自己名下的UTXO作为交易输入，可能需要拼凑找零。

UTXO模型


输入：资金来源
输出：资金运用（去向）
来源1：
区块号
交易ID
该交易中的哪一笔输出
认领脚本
来源2：
区块号
交易ID
该交易中的哪一笔输出
认领脚本
来源K：
区块号
交易ID
该交易中的哪一笔输出
认领脚本
输出1：
资金数量
招领脚本
输出2：
资金数量
招领脚本
输出N：
资金数量
招领脚本

交易的数据结构

class **CTransaction** {}　//一个交易请求或交易记录

] const std::vector<CTxIn> vin　　//本Tx的输入UTXO序列，即资金来源。

] const std::vector<CTxOut> vout　　//本Tx的输出UTXO序列，即资金去向。

] const int32_t　nVersion　　// CURRENT_VERSION=2

] const uint32_t　nLockTime　　//锁定时间，时间未到点之前本交易不入块。

] const uint256　hash　　//本Tx的Hash值，只存储在内存中，
//不作永久存储也不发送。

CTxOut的结构

class **CTxOut** {}

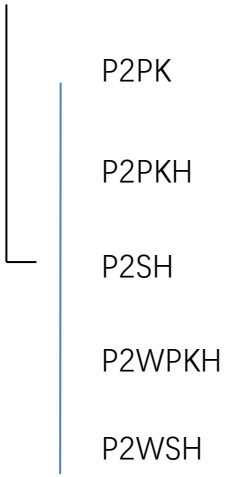
] CAmount nValue　　//本项输出即该UTXO所承载的（比特币）价值

] CScript scriptPubKey　　//招领脚本，虽然名为scriptPubKey，

//却未必只是以公钥为条件的脚本

一个UTXO实际包含<区块ID::交易ID::输出项序号>，然后才是CTxOut中的支付金额和招领脚本。

Value（支付金额）	scriptPubKey（招领脚本，即领用条件）



CTxIn的结构

class **CTxIn** {}

] COutPoint prevout //Previews Output。指向具体的资金来源，
//说明来自那一项交易的第几项输出，展开如下：

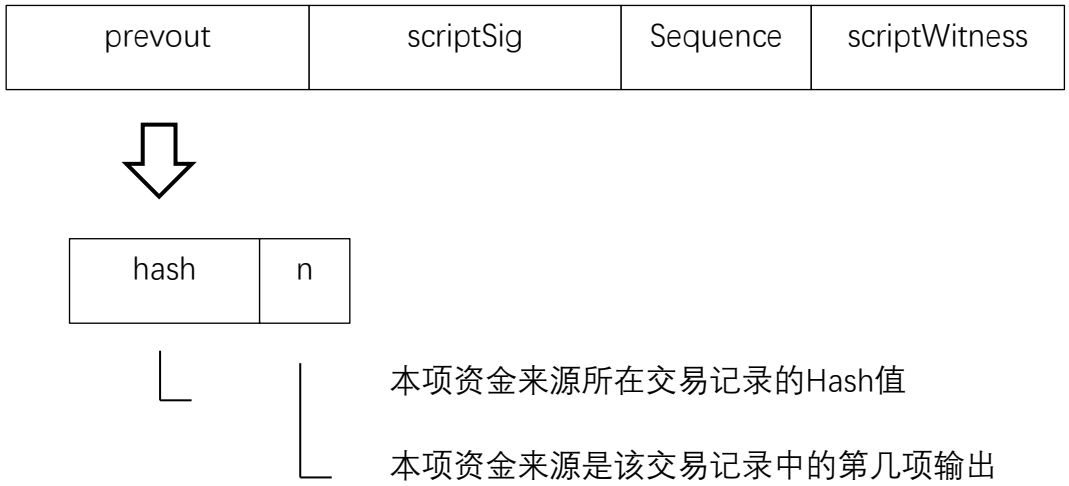
]] uint256 hash //资金来源所在Tx的Hash值，唯一地确定了一个Tx。

]] uint32_t n //本项资金来源是该Tx中的第几项输出。

] CScript scriptSig //为认领该项资金而提供的“签名脚本”（认领脚本）。

] uint32_t nSequence //具有特殊作用。

] CScriptWitness scriptWitness; //见证脚本的数据，0x00表示无.



比特币虚拟机

- 比特币节点软件的一个模块
- 堆栈结构
- 运行的程序：
  - 认领脚本 scriptSig
  - 招领脚本 scriptPubKey
- 指令集：有限能力，主要验证签名是否正确
  - OP_CHECHSIG,OP_DUP,OP_HASH160,OP_EQUALVERIFY……

招领脚本scriptPubKey

- P2PK，“Pay to Public Key”，付给公钥。付给给定256位公钥的主人。
- P2PKH，“Pay to Public Key Hash”，付给公钥的Hash值。这里所谓的Hash，是特指对于256位公钥的160位Hash，那就是对方的“地址”。
- P2SH，“Pay to Script Hash”，付给脚本的Hash值。给定一个脚本的Hash值，付给能提供这个脚本的对象，所提供脚本的Hash值必须与给定的Hash值相同。这个脚本是收付双方预先约定的，是双方在“链外” 约定的。
- 需要多方签名并采用SegWitness脚本的支付，具体又有两种：
  - P2WPKH，“Pay to SegWitness Public Key Hash”，付给SegWitness形式的多个公钥Hash值。
  - P2WSH，“Pay to SegWitness script Hash”，付给SegWitness形式的脚本Hash值。

招领脚本scriptPubKey：执行举例

P2PK - 凭公钥支付（Pay to Public Key）

招领脚本scriptPubKey： <pubkey> | OP_CHECKSIG

//脚本中的第一项是对方的公钥，第二项是一条OP_CHECKSIG指令。

//意为：检验认领脚本中提供的签名。

// 结合所提供的签名与交易请求的Hash值，

// 计算出对方的公钥，算得的公钥须与第一项相符。

程序缓冲区中的内容就是： <sig> | <pubkey> | OP_CHECKSIG

执行过程：

- 程序指针指向的第一个元素是数据<sig>，所以将其压入堆栈，指针前移。
- 下一个元素<pubkey>又是数据，就又将其压入堆栈，指针前移。
- 下一个元素是指令OP_CHECKSIG，即检查签名，这是一条双操作数指令，所以就从堆栈抛出刚才压入的两个操作数，进行计算。

支付通道

- 用于链外支付或其他交易
- 面向性能要求高、交易数量大等场景
  - 第一个支付通道应用场景：阿根廷有线电视比特币付费，按秒计费，如果每秒计费交易上链，比特币区块链无法满足性能要求，也会面对海量交易压力。
- 涉及的链上交易：
  - 注资交易（Funding Transaction）
  - 应承交易（Commitment Transaction）
  - 决算交易（Settlement Transaction）
  - 退款交易（Refund Transaction）

支付通道

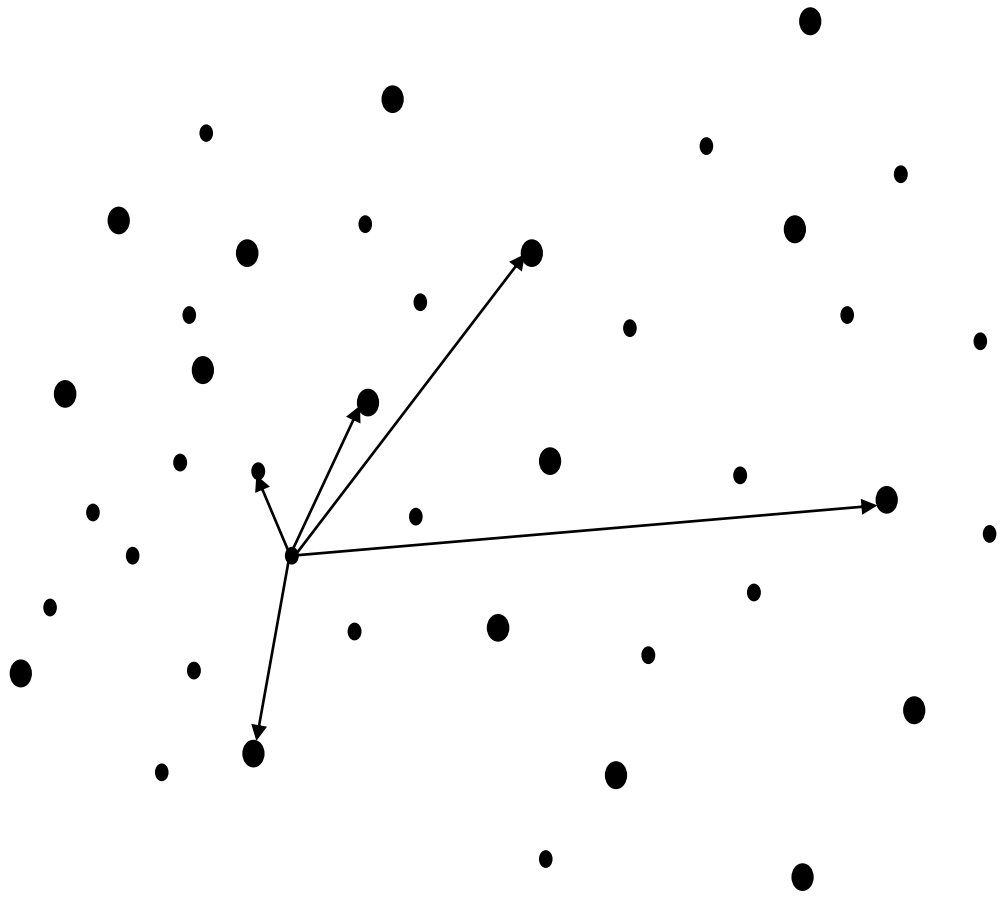
- Funding transaction，建立支付通道
  - A、B双方建立一个2-of-2多签名的联合地址，由拟议中的付方发布一个交易将一笔钱打到这个地址中；但这是P2SH支付，即支付给能够正确提供清算脚本Hash值的收款方，因为是2-of-2就必须有双方的签名才能花，。这是后面链外支付的资金来源。
  - 1个付款方：单向通道，2个付款方：双向通道
- Commitment transaction
  - A、B双方的链下交易，可以有很多个，不上链。每次支付的资金都来自同一个UTXO，每次交易的输出分成两部分，一是给收方的UTXO，其数值是付方至此为止承诺支付的总和，二是给付方自己的找零。
- Settlement transaction
  - 收款方把手中由付款方开具并签名的最后那个应承交易上签上自己的名并把它发送到比特币网上，从当初注资阶段生成的那个UTXO中把钱划给自己，同时把剩余的钱（如果还有的话）找还给付款方。这个操作也可以由付款方发起，因为收款方每次收到应承交易都会签上自己的名并发还给付款方。

闪电网络（ Lightning Network ）

- 是一种支付通道，除了支付通道上述交易外，还有：
  - 转存交易（Delivery Transaction），任何一方都可以从联合地址认领属于自己的资金，把它转到一个自己更方便花费的地址中。
  - 可撤转存交易（Revocable Delivery Transaction），可以撤销。
  - 补救交易（Breach Remedy），这是在对方违约情况下加以补救并使对方受惩罚的交易。

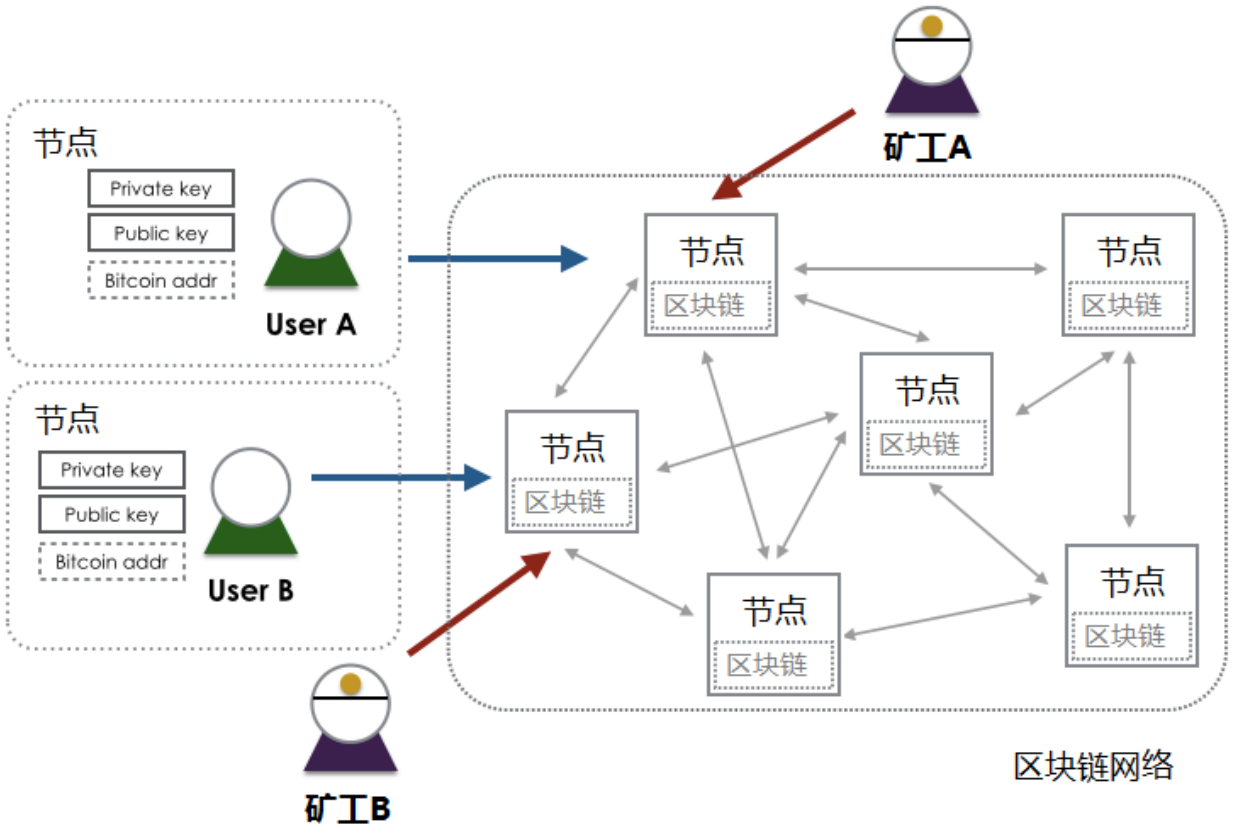
比特币区块链的网络通信

- P2P通信
  - 种子节点
  - 伙伴列表
  - 发现伙伴



区块链技术的定义

- 区块链技术是一种以非对称加密技术对交易进行数字签名，通过工作量证明等共识机制进行记账节点协调，数据以链式区块形式组织存储的分布式账本技术。



区块链支撑技术

- 非对称加密与数字签名
- 哈希计算：SHA256算法
- 链式区块结构
- Merkle树
- 共识机制
  - 拜占庭将军问题（Byzantine Generals Problem）
  - PoW, PoS, DPoS
  - PBFT、Raft

区块链技术的优点

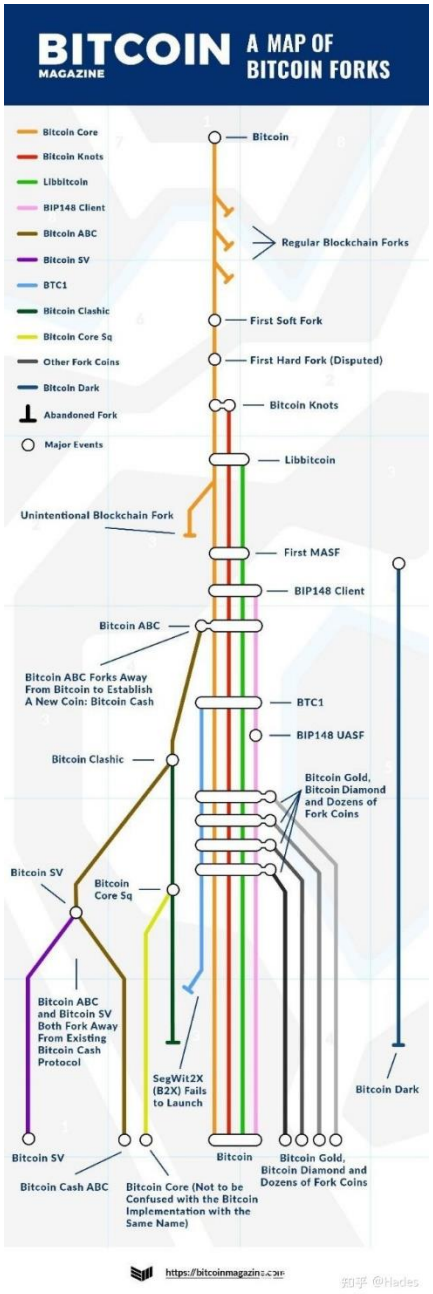
- **去中心化**：避免垄断，点对点交易，去代理
- **数据公开**：无暗箱操作，平等性，开放生态体系
- **可信**：数据永久可靠，记录可信
  - 信任体系、价值传递体系

比特币区块链的问题

- **隐私问题**
  - 匿名地址如何监管
- **性能问题**
  - 交易确认时间长
  - 区块容量有限
- **系统性风险**
  - 区块链分叉和51%攻击

比特币分叉

- 比特币协议分叉不同于区块链共识中常规分叉，而是因为协议升级或分歧，导致遵循不同协议的软件所产生区块链不兼容，形成各自生长的链。
- 硬分叉、软分叉：主要看协议变化的程度



比特币分叉：比特币现金

- 香港共识：2016年2月20日，来自中国的矿工邀请来自海外的开发者，在香港的数码港就扩容问题召开了会议。开发者同意比特币区块从1M扩容到8M，作为交换，中国矿工也同意只运行Core，而不再支持Gavin的版本，即所谓“香港共识”。
- 纽约共识：区块的拥堵已经让比特币生态的商业企业普遍意识到了扩容的紧迫性，在全球50多家重要企业参加的纽约会议上，达成了扩容至2M的“纽约共识”。
- Bitcoin Cash（BCH）分叉：比特大陆吴忌寒提出做一个扩容的分叉版本，作为纽约共识失败的备胎。2017年6月ABC开发团队完成了扩容到8M的比特币版本——比特币现金（BCH），于2017年8月1日正式上线。

深入阅读

- 比特币白皮书
- 比特币源码

谢谢！