北京航空航天大學

Beijing University of Aeronautics and Astronautics

区块链基本原理

胡　凯

北航计算机学院

010-82339460

hukai@buaa.edu.cn

计算机学院

课程目标

1. 培养接受新技术原理能力：掌握区块链的基本原理和基本技术体系；

2. 培养学科交叉思维和创新能力：掌握分布式、区块链的思维方式、结合数字经济宽广的领域，创新技术赋能模式；

3. 培养多种技术融合的工程应用设计能力：掌握分布式、区块链等技术和数字经济应用场景结合的设计方法；

- 毕业要求1：能跟踪学习新技术带来的思维和理论知识，提高毕业后职业适应能力和创新。
- 毕业要求2：能融合运用交叉技术，提高技术融合和工程应用能力

课程要求

参考书目：

- ✓互链网：将来世界连接方式：蔡维德等，2020年，东方出版社
- ✓智能合约：重构社会契约：蔡维德等，2020年，法律出版社
- ✓分布式计算系统导论-原理与组成： 作者 北航 胡建平，胡凯，清华出版社 2014；
- ✓区块链革命：作者 [加]唐塔普斯科特（Don Tapscott），[加]亚力克斯·塔普斯科特著；凯尔，孙铭，周沁园 译；
- ✓数字经济影响未来的新技术、新模式、新产业：作者 汤潇 人民邮电出版社 2019.5

课程要求：

1~9周，无故旷课2次者没有成绩

课程考核：

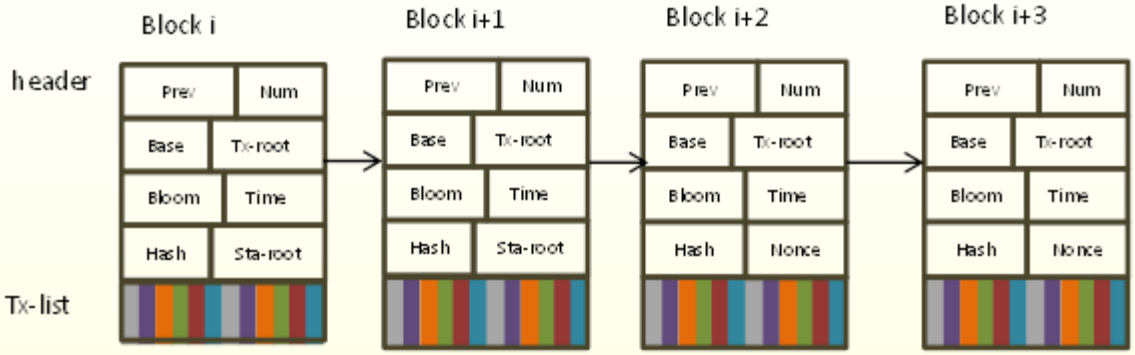
基于所学习的课程内容，针对数字经济某个应用场景，调研完成一个区块链应用设计报告。

成绩判定方法：

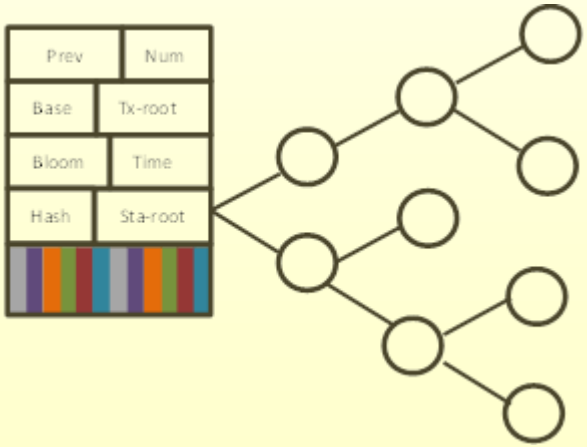
1. 设计目标清楚，并能结合区块链特点设计应用模式为合格；

2. 有详细应用设计，设计合理可应用性较强为良好；

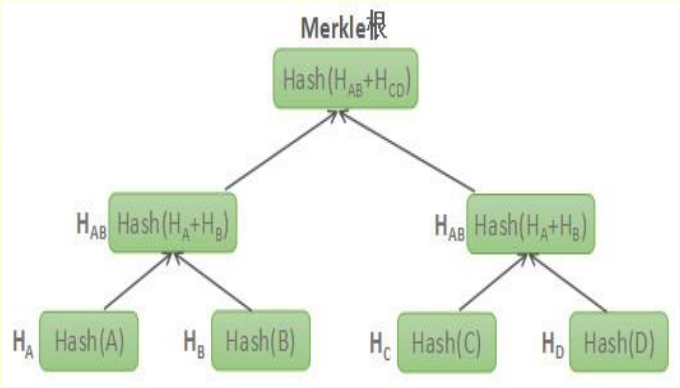
3.具有技术融合或一定的创新设计、 或有一定的原型实现为优秀。



Prev：表示前一个区块的哈希值，
Num：表示块号，
Base：表示制作区块的节点公钥地址
Tx-root：表示交易树根哈希值
Bloom：每个交易的哈希过滤器（算法）
Time：表示区块构造的时间
Hash：表示这个块的Hash（算法）
Sta-root：状态树的根哈希值。



MPT{key, value}
状态树的节点：
• Key是账户的公钥地址，
•Value：为账户的值。
交易树的节点：
• Key：为被处理的序列号，
• Value：为交易的信息。
树存在数据库中。



区块链发展史

发展史

- 2008年11月1日，一个自称中本聪(Satoshi Nakamoto)的人在一个隐秘的密码学讨论组上贴出了一篇研究报告，报告阐述了他对电子货币的新构想，比特币就此问世!
- 2010年12月12日6点22分，就在他发帖争辩给维基解密捐赠比特币7天后，中本聪在论坛发了最后一个帖子。
- 2009年1月3日，中本聪制作了比特币世界的第一个区块“创世区块”并挖出了第一批比特币50个。
- 2010年5月21日，佛罗里达程序员用1万比特币购买了价值25美元的披萨优惠券，随着这笔交易诞生了比特币第一个公允汇率。
- 2010年7月，第一个比特币平台成立，新用户暴增，价格暴涨。
- 2011年2月，比特币价格首次达到1美元，此后与英镑、巴西雷亚尔、波兰兹罗提汇兑交易平台开张。
- 2012年，瑞波（Ripple）发布，其作为数字货币，利用区块链转移各国外汇。
- 2013年，比特币暴涨。美国财政部发布了虚拟货币个人管理条例，阐明虚拟货币释义。
- 2014年，以中国为代表的矿机产业链日益成熟，同年，美国IT界认识到了区块链对于数字领域的跨时代创新意义。
- 2015年，美国纳斯达克证券交易所推出基于区块链的数字分类账技术Linq进行股票的记录交易与发行。

实现了数据传输中对数据的自我证明，降低了全球“信用”的建立成本

发展史

- 2015.7 以太坊发布Frontier版，开创区块链2.0时代
- 2015.10.《经济学人》封面文章，制造信任的机器—比特币后面的技术将如何改变世界
- 2015英国宣布区块链为国家战略
- 证券交易所：2015年12月，纳斯达克首次在个股交易商使用区块链技术，基于区块链技术的交易平台Linq
- 会计审计机构：主要会计事务所都宣布进军区块链，德勤推出软件平台Rubix
- 银行体系：区块链联盟R3 CEV近期宣布，50家银行，R3分布式账本：CORDA
- 高盛、摩根大通、德银等机构以及Blythe Masters（华尔街CDS女皇）普遍认为区块链将会成为互联网金融的下一站
- 7家华尔街公司成功测试区块链用于信贷违约掉期交易
- 英格兰银行准备发行中心化数字货币RSCoin
- 美国商品期货交易委员会尝试将区块链应用于票据交换
- 科技企业：IBM开放式账本项目（Open Ledger Project）
- IBM和三星展示了应用区块链技术控制互联设备的概念平台ADEPT
- 区块链技术公司BitSE：区块链防伪平台Vechain业务
- 万云区块链云平台提供的BaaS
- 井通的“企业级钱包”，服务海航的供应链融资

区块链思维

第一场区块链婚姻

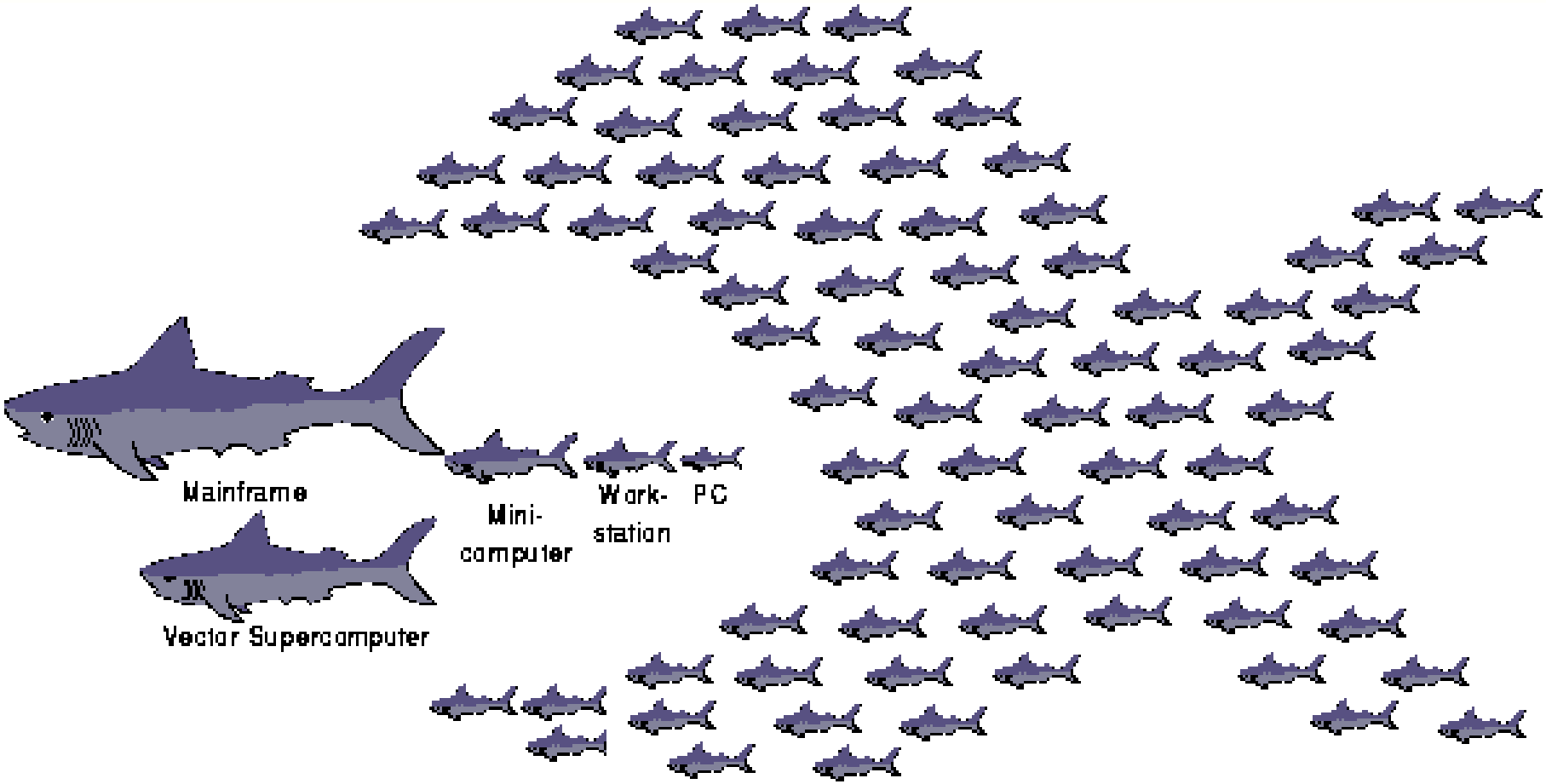
- 2015.10.5，第一场区块链婚礼上，两位新人将他们的结婚誓言记录在了区块链上，整个过程都没有政府或是宗教的介入。区块链里将会有伴侣之间的真正合约。

区块链价值

- 浏览器的创始人马克.安德森：“区块链是互联网上一直被需要却有一直没有实现的分布式可信网络，这是我们一直在等待的重大突破，它把一切问题都解决了，应该得诺贝尔奖”
- 区块链是一种分布式账本，价值传递互联网和货币互联网
- 区块链是一种数据库革命，它是时间轴数据库！
- 区块链是下一代互联网！重塑商业世界
- 37%的受访者认为，2016年互联网金融颠覆的最大机遇所在
- 据Accenture预测，“引爆点”预计将在2018年发生，增长期到2025年。
- Gartner公布的2017年十大技术趋势之一

区块链技术有潜力引领所有行业的潮流！

生物进化论


Mainframe
Mini-computer
Work-station
PC
Vector Supercomputer
NOW

狼群理论

- 低带宽通讯：竖尾、表情转达攻击信息
- 层次管理：头狼领导，通过等级传递不断队形
- 动态重组：组成不同的战斗队来攻击不同的猎物，包括不同的策略（如攻击小鹿或驼鹿）
- 协同分工：一旦攻击，各狼会分工合作攻击不同部位
- 冗余结构：一只狼受伤或退出，另一只将接替

复杂的集体行为能够通过简单的个体行动的自同步来实现！

技术演化

- 1982年 Lamport提出拜占庭将军问题

  David Chaum提出密码学支付系统，具有不可追踪的特性，是比特币区块链在隐私安全面的雏形
- 1985年 提出椭圆曲线密码学
- 1990年 提出Paxos
- 1991年 使用时间戳确保数字文件安全(被比特币采用)
- 1992年 提出椭圆曲线数字签名算法ECDSA
- 1997年 Adam Back发明Hashcash技术

  一种工作量证明演算法，应用于阻挡垃圾邮件
- 1998年Wei Dai发表匿名的分散式电子现金系统B-money

  许多设计之后被比特币区块链所采用

  Nick Szabo发表Bit Gold：参与者可贡献运算能力来解出加密谜题
- 2005年 Hal Finney可重复使用的工作量证明机制（RPOW）出现
- 2008年比特币区块链

技术的位置

- 1974诞生的TCP/IP协议：决定了区块链在互联网技术生态的位置

- 1984年诞生的思科路由器技术：是区块链技术的模仿对象

每台路由都保存完成的互联网设备地址表，一旦发生变化，会同步到其他路由器上，确保每台路由器都能计算最短最快的路径。

- B/S（C/S）架构：区块链的对手和企图颠覆的对象

1989年欧洲物理学家蒂姆·伯纳斯·李发明万维网并放弃申请专利。此后近30年中，包括谷歌，亚马逊，facebook，阿里巴巴，百度，腾讯等公司利用万维网B/S（C/S）结构，成长为互联网的巨头。

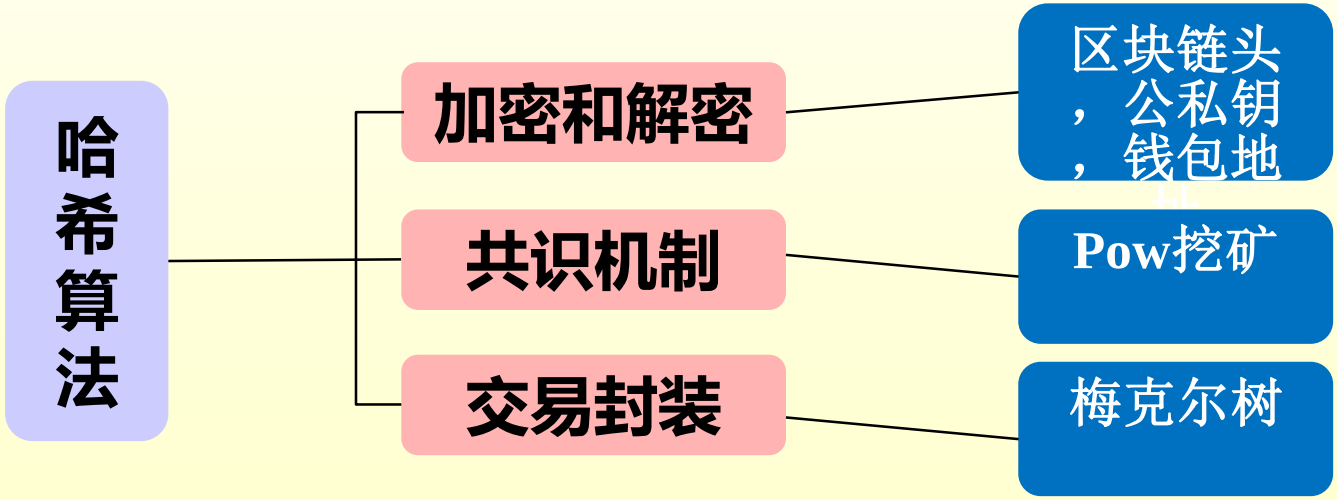
- 对等网络（P2P）是区块链的父亲和技术基础
- 哈希算法：产生链和加密的关键
- 共识算法是区块链核心

区块链基础知识

哈希算法的核心作用

SHA256算法为例，无论输入是什么数据文件，输出就是256bit，16进制是64位，如：

00740f40257a13bf03b40f54a9fe398c79a664bb21cfa2870ab07888b21eeba8



哈希函数特性

特性：

- 碰撞阻力：如果无法找到两个值x和y， x<>y， 但H（x）=H(y)，则称H具有碰撞阻力

  应用：文件信息摘要，用户上传文件

- 隐秘性：知道H(x) 不能反推出x

  应用：承诺　　投标书

  com:=commit(msg, nonce)

  已知com, 没法找到msg

  没有两组不同的(msg, nonce)，有相同的com

- 谜题友好：如果输入有一些非常随机，将很难求得哈希的输入
- 易压缩，易计算

常用的哈希函数

主要包括MD4，MD5，SHA-1，SHA-2

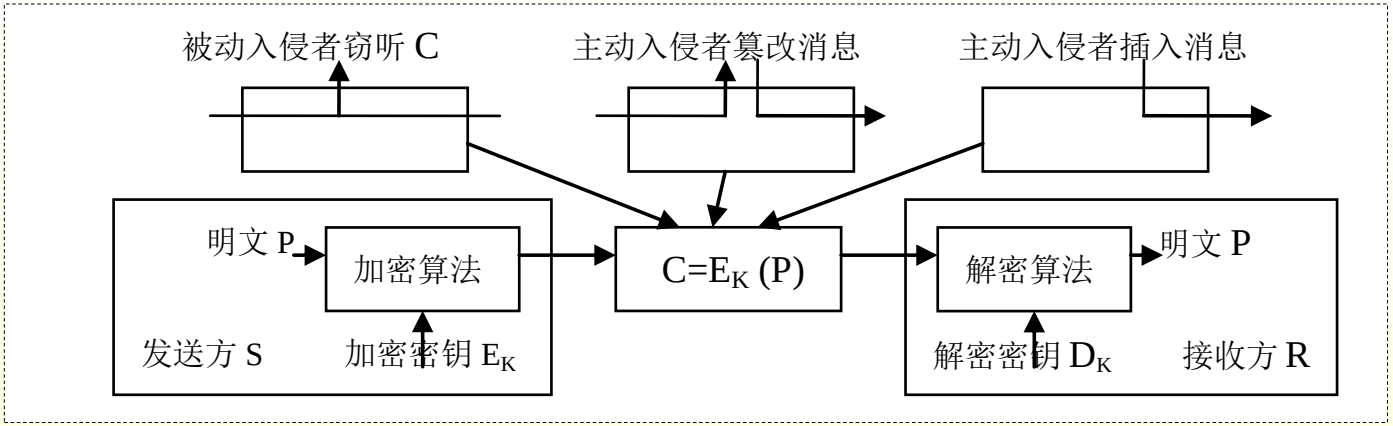
MD4：RFC1320定义，MIT的Ronald 1990 设计，128位，已不安全
MD5：RFC1321定义，MD4的改进版，128位，不具备强抗碰撞性
SHA系列，美国国家安全局设计，美国国家标准
SHA-0：1993年发布，很快被撤回
SHA-1:1995年发布，应用广泛，2017年荷兰和谷歌称破解了它
SHA-2:2001年发布，包括了SHA-224，SHA-256，SHA-384…等，至今安全
SHA-3:2015年发布，新的算法
RIPEMD160算法，RACE原始完整性校验消息摘要，比利时COSIC小组开发，1996年发布，改进了MD系列。

2004年中国王小云团队破解MD系列，2005年破解SHA-1

常用密码算法

- 古典密码学：1949年前，基于加密算法的保密性，古老的算法。
- 现代密码学：1949年，香农“保密系统的通信理论”，对称密码学，DES和AES，基于密钥安全，复杂计算密码。如通过AES对钱包私钥进行加密，保护私钥。
- 公钥密码学：1976年 Whitfield Diffie 和Martin Hellman提出基于数学难题的公钥密码机制。1978，RSA公钥密码机制提出。
- 椭圆曲线密码体制ECC：1985年 Neal Koblitz和Victor Miller分别提出的，比RSA更安全、更小的密钥，私钥可通过伪随机数生成。证明数据是签名者发出的，不可抵赖的。
- 椭圆曲线数字签名算法ECDSA：1992年 Scot和Vanstone提出，成为国际标准
- Base58编码：一种可读的编码方式，如用于产生钱包地址

密码体制



防止三种不同的安全威胁：窃听、篡改消息、插入信息。

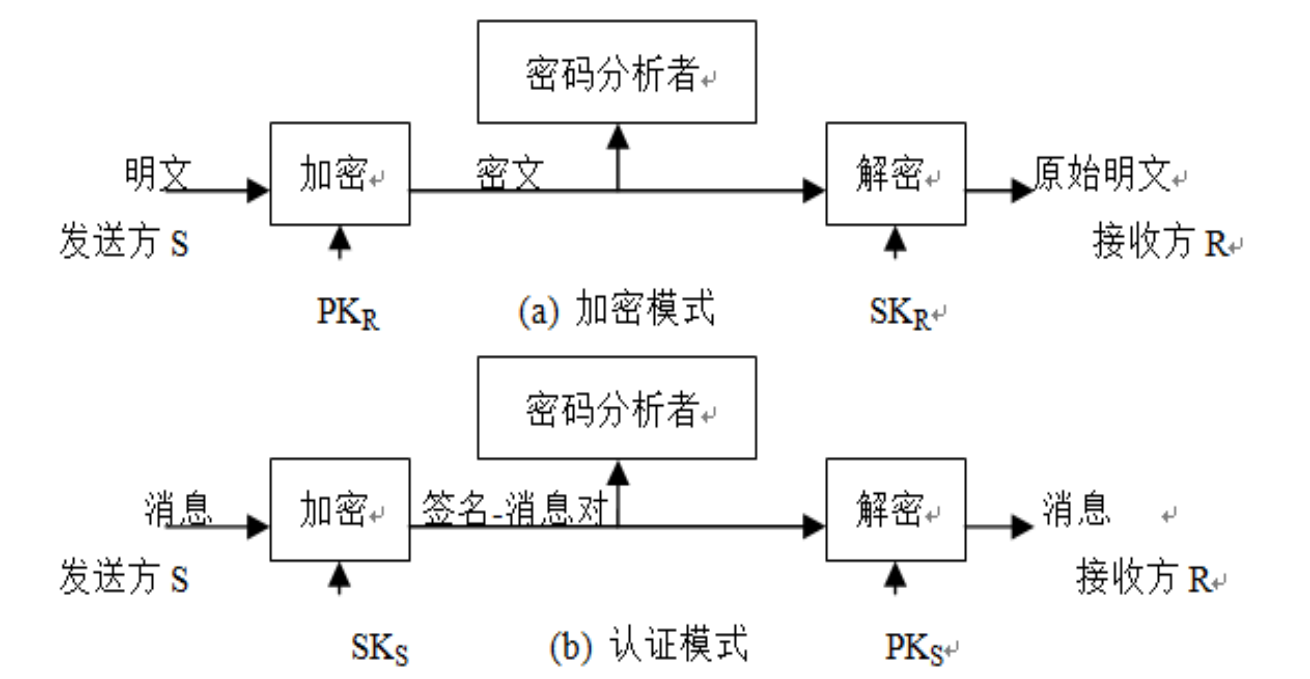
加密密钥和解密密钥是否相同？

- 对称密码体制： $P=Dk(Ek(P))$
- 非对称密码体制： $P=Dk1(Ek2(P))$

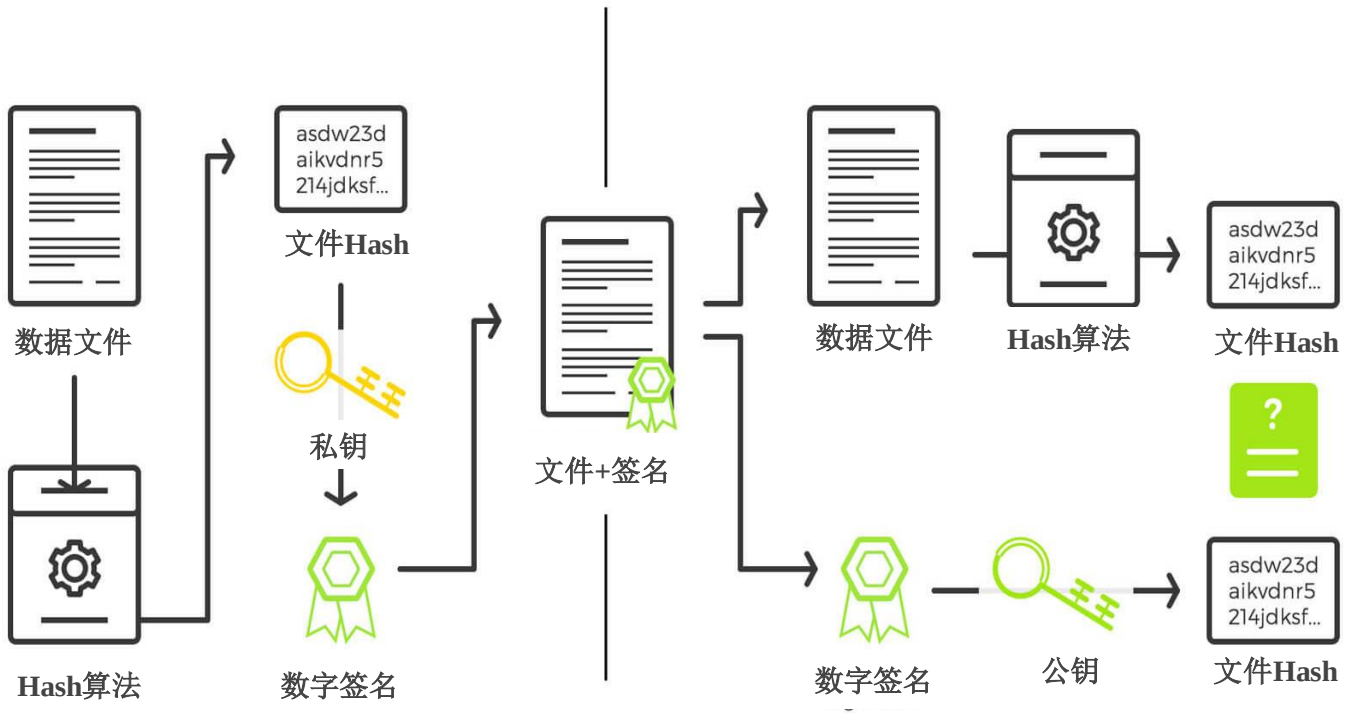
非对称密码体制

- 基于大数因子分解困难的RSA （发明者缩写）公钥密码系统
- 基于椭圆曲线离散对数求解困难的ECC(Elliptic Curves Cryptosystem)公钥密码系统

加密模式：发送方用接受方公钥加密，接受方用自己私钥解密
认证模式：发送方用自己私钥加密，接受方用发送方公钥解密



签名

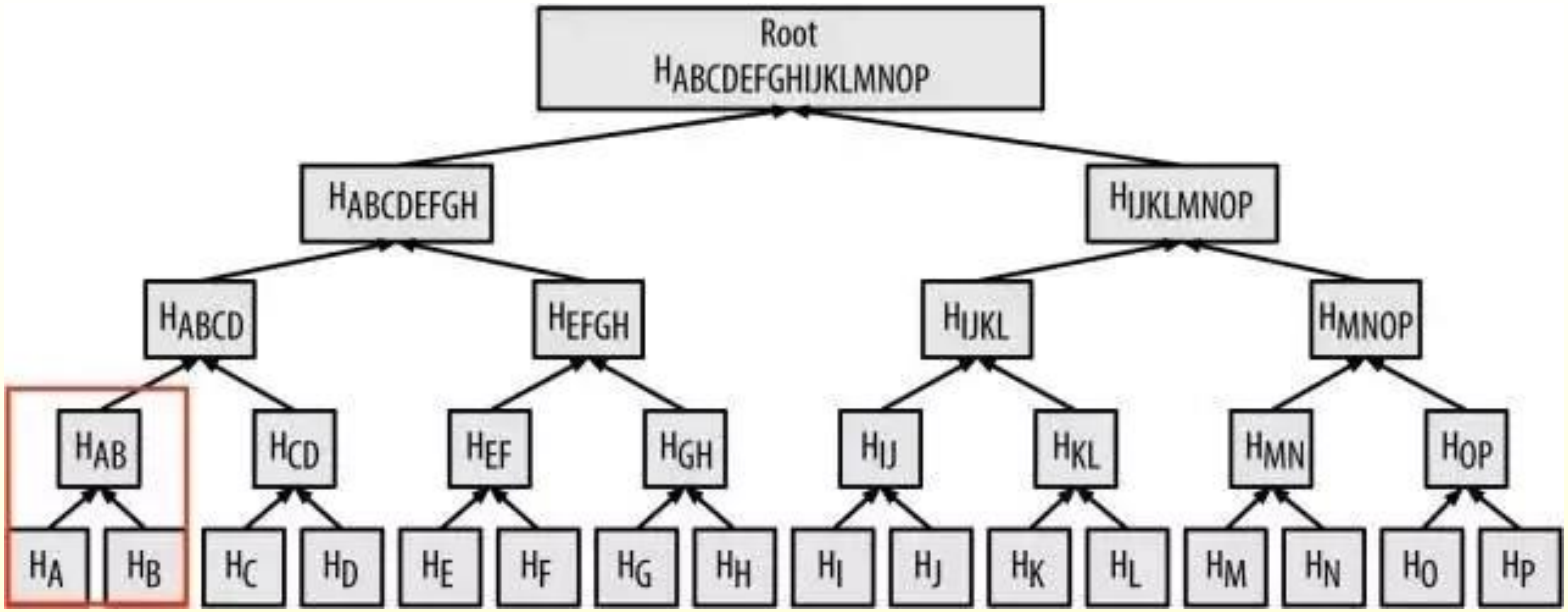

数据文件
Hash算法
asdw23d
aikvdnr5
214jdksf...
文件Hash
私钥
数字签名
文件+签名
数据文件
Hash算法
asdw23d
aikvdnr5
214jdksf...
文件Hash
?
数字签名
公钥
asdw23d
aikvdnr5
214jdksf...
文件Hash

1989年著名密码学家Merkle提出

- 2003年 Michael Szydelo采用尽量减少冗余哈希函数值，对树的遍历算法和计算量进行了改进
- 2005年 Glen Nuckolls提出了混合树的思想，降低了对树高的依赖
- 2006年 W.E.Hall提出平行认证树的思想，借助外部设备，实现对多个叶子节点同时进行认证。
- Johannes Buchmann提出CMSS方案，提高数的签名数量，后又提出了新一代时空大数据平台，使签名数量进一步增加。

如何进一步提高Merkel树认证的效率仍然有待于进一步研究

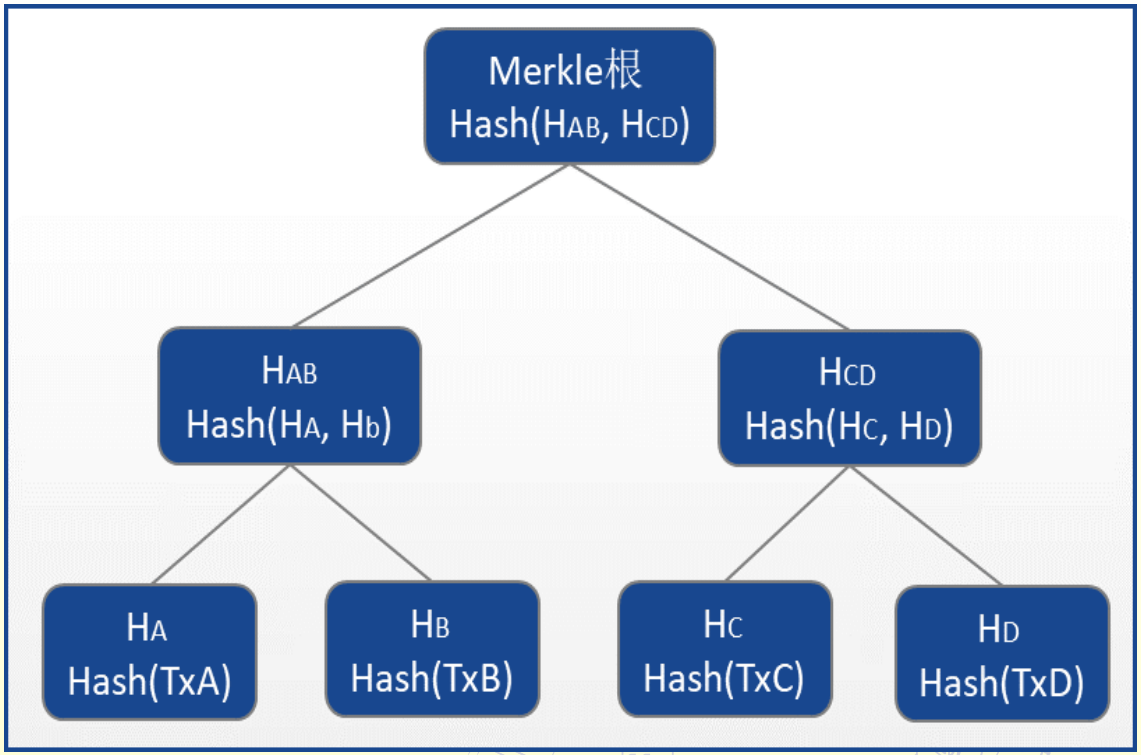
Merkle树计算



2048个交易,进行11次打包，得到1个哈希值
65536个交易,进行16次打包，得到1个哈希值
1048576个交易,进行20次打包，得到1个哈希值

每次哈希计算大约需要0.01秒，计算20次需要0.2秒

Merkle 树快速验证



防篡改

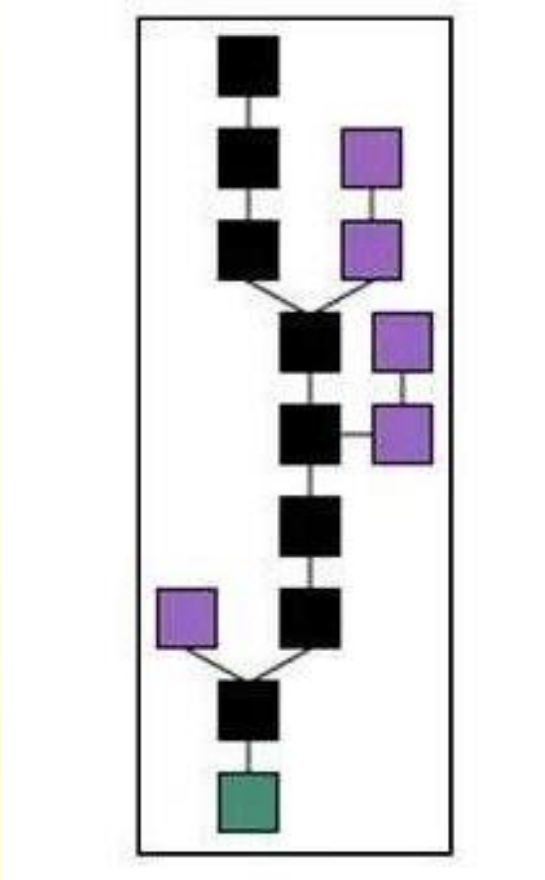
树种任意叶子节点发生改变，都会导致最终树根的该表，因此可以通过树根唯一对应一组叶子节点

存在性证明

可以使用少量数据快速证明一个节点的存在性，比如证明Hd存在于树中，只需要提供HC、HAB、Root其他人便可以通过计算快速验证

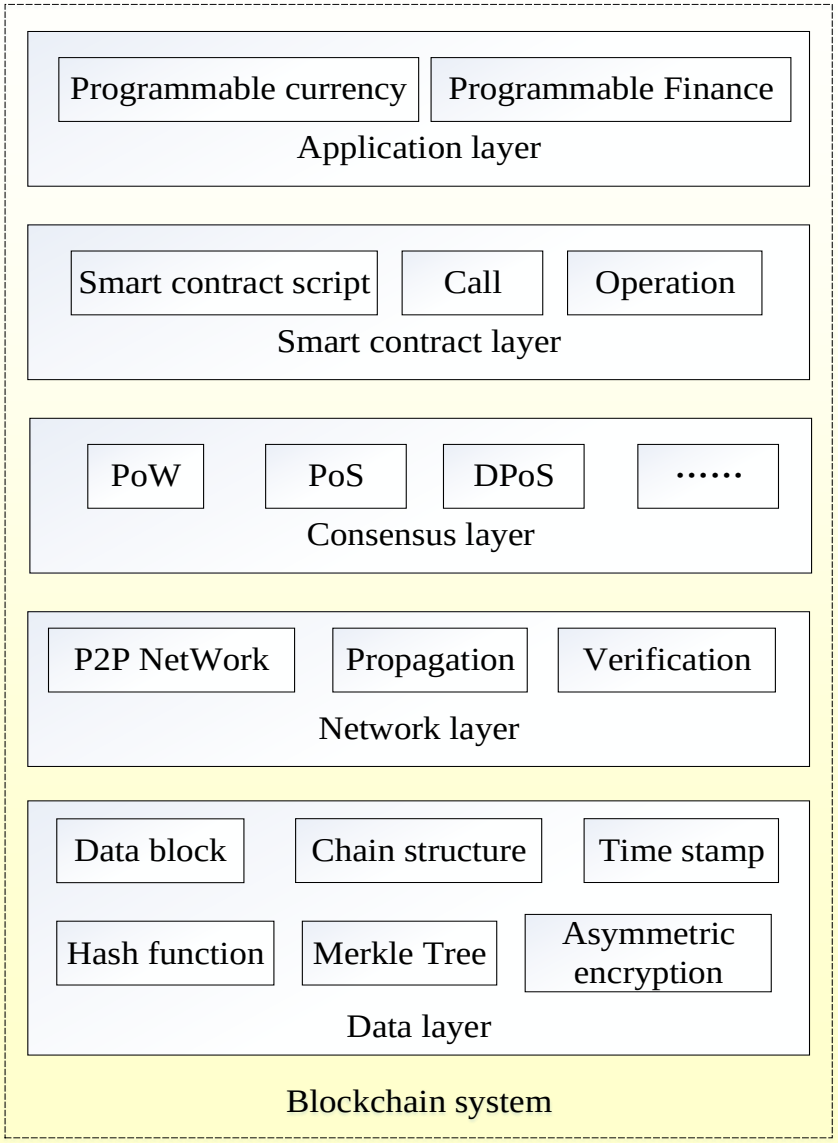
什么是区块链

- 区块链是一种“去中心化”的数据库，包括一张被称作“区块”（Block）的列表，其中每个区块都含有一个“时间戳”（Timestamp）、一条与前一个区块的“链接”（Link）和交易数据。
- 区块链是一个基于比特币协议的不需要许可的分布式数据库，他维护了一个持续增长不可篡改的的数据记录，对运营者也是如此。



如图所示，黑色的区块主链，而紫色的孤立区块在主链之外存在

区块链分层结构



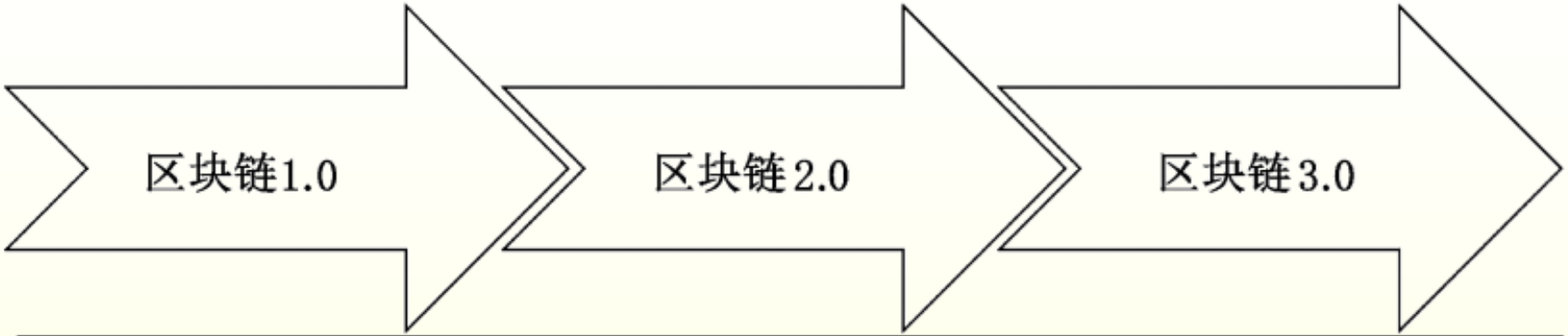
四大特征：

Distributed,
Autonomous,
Contractual,
Trackable

区块链种类

- 1.公有区块链（Public blockchains）
  公共区块链是指全世界任何人都可读取的、任何人都能发送交易且交易能获得有效确认的、任何人都能参与其中共识过程的区块链——共识过程决定哪个区块可被添加到区块链中和明确当前状态。作为中心化或者准中心化信任的替代物，公共区块链的安全由“加密数字经济”维护——“加密数字经济”采取工作量证明机制或权益证明机制等方式，将经济奖励和加密数字验证结合了起来，并遵循着一般原则：每个人从中可获得的经济奖励，与对共识过程作出的贡献成正比。这些区块链通常被认为是“完全去中心化”的。
- 2.联盟区块链：（Consortium blockchains）
  联盟区块链是指其共识过程受到预选节点控制的区块链；例如，不妨想象一个有15个金融机构组成的共同体，每个机构都运行着一个节点，而且为了使每个区块生效需要获得其中10个机构的确认（2/3确认）。区块链或许允许每个人都可读取，或者只受限于参与者，或走混合型路线，例如区块的根哈希及其API（应用程序接口）对外公开，API可允许外界用来作有限次数的查询和获取区块链状态的信息。这些区块链可视为“部分去中心化”。
- 3.完全私有区块链（Fully private blockchains）
  完全私有的区块链是指其写入权限仅在一个组织手里的区块链。读取权限或者对外开放，或者被任意程度地进行了限制。相关的应用囊括数据库管理、审计、甚至一个公司，尽管在有些情况下希望它能有公共的可审计性，但在很多的情形下，公共的可读性并非是必须的。

区块链发展



可编程货币	可编程金融	可编程社会
区块链1.0的主要功能是数字货币，是加密货币的应用，它构建了去中心化的数字支付系统，实现了快捷的货币交易、跨国支付等多样化的金融服务，它的主要代表是比特币	区块链2.0时代主要是智能合约的应用，主要领域扩展到金融领域，是智能资产、智能合约市场的去中心化，可作货币之外的数字资产转移,区块链在金融和市场的应用中更加广泛	区块链技术以去中心化的方式配置全球资源，进一步延拓到货币、经济和市场以外的领域，其潜在的应用领域包括选举、医疗、公证、版权，以及网络安全、汽车租赁、学历鉴定等

区块链1.0

区块链1.0： 比特币

提出分布式账本概念：

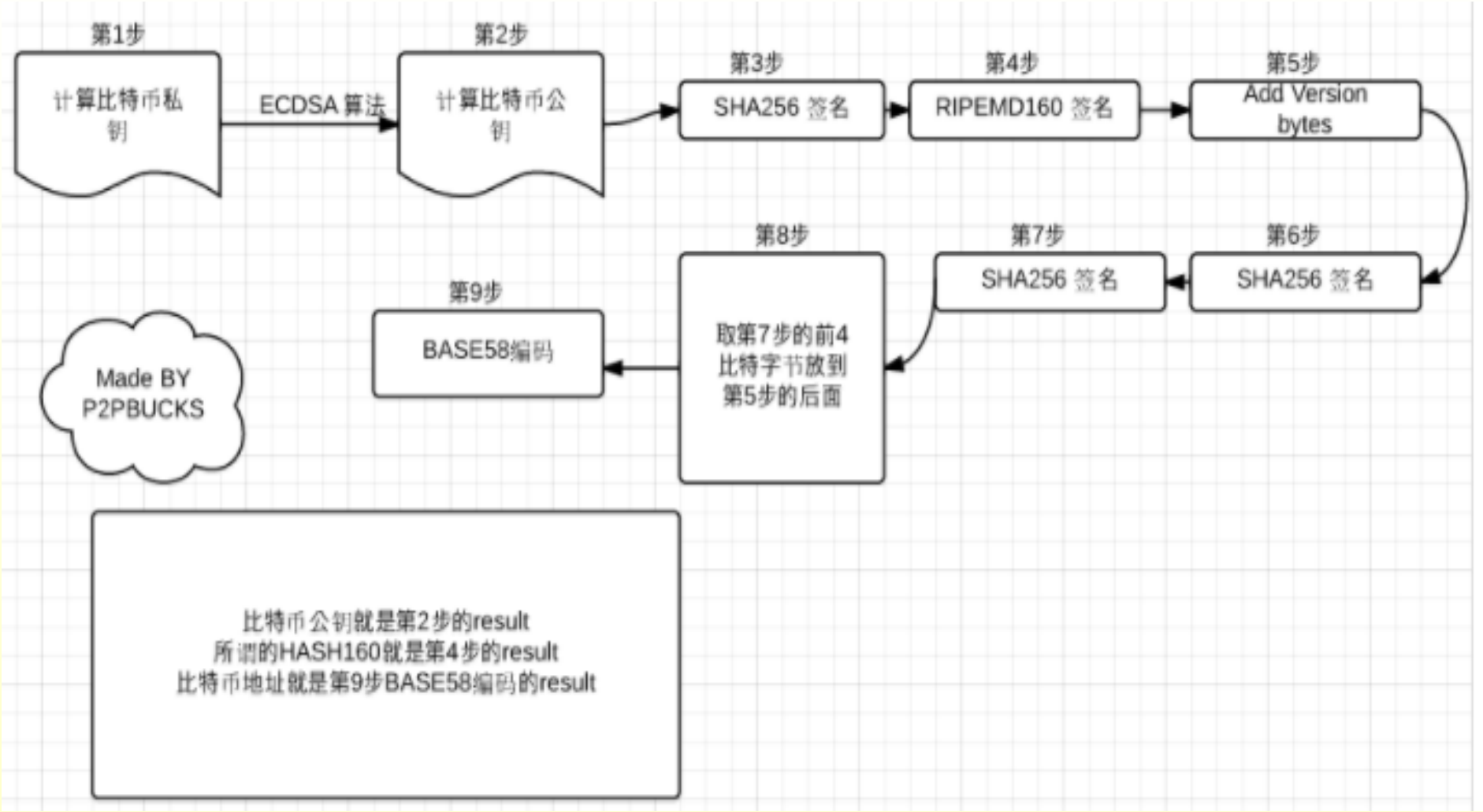
- 存放在互联网的分布式节点上，每个节点有完整的备份
- 记录着自诞生以来的所有转账交易记录
- 分区块链存储，每块包括部分记录，每一个区块有前一块的ID，形成一个链状的结构
- 发起交易时，把交易信息广播到P2P网络中，纪录到一个区块中，新区块链链接到区块链上。

比特币的思维

- 比特币：意在解决“法币滥发”经济难题，是不可逆的发明，第一次在数字世界创造了一种不可复制又不是中心化的路径，“论子、发动机、复印件、互联网、移动电话、传感器、社交软件”等，没有时，不觉得少什么，一旦应用，则不可或缺，世界无法回到没有它的状态。
- 激励机制：将一定数量新货币持续添加到货币系统中的方法，非常类似于耗费资源去挖掘金矿，并将黄金注入流通领域。CPU的时间和电力消耗就是资源消耗。
- 利益驱动诚实：如果有人能调动相当的计算力，他要面临一个选择，将其用于产生新的挖币，还是将其应用于双花攻击？他会发现，诚实工作更有利所图，不是破坏规则和系统，使其利益受损。
- 工作量证明机制：解决了集体投票表决时谁是大多数的问题。一个IP一票易被破坏，按CPU算力投票，最长的链包括最大的工作量。

  攻击者试图赶上随后的区块，其成功概率将呈指数化递减。

比特币地址生成


第1步
计算比特币私钥
ECDSA 算法
第2步
计算比特币公钥
第3步
SHA256 签名
第4步
RIPEMD160 签名
第5步
Add Version bytes
第6步
SHA256 签名
第7步
SHA256 签名
第8步
取第7步的前4比特字节放到第5步的后面
第9步
BASE58编码
Made BY P2PBUCKS
比特币公钥就是第2步的result
所谓的HASH160就是第4步的result
比特币地址就是第9步BASE58编码的result

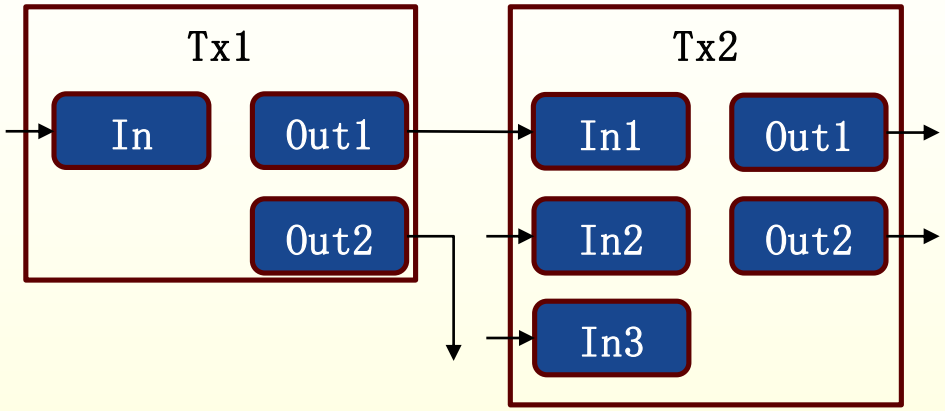
记账方式

Account： 易于理解、节省空间、易于实现、模式成熟
UTXO： 比特记账方式，原理简单、易于扩展、高度并行、隐匿性强

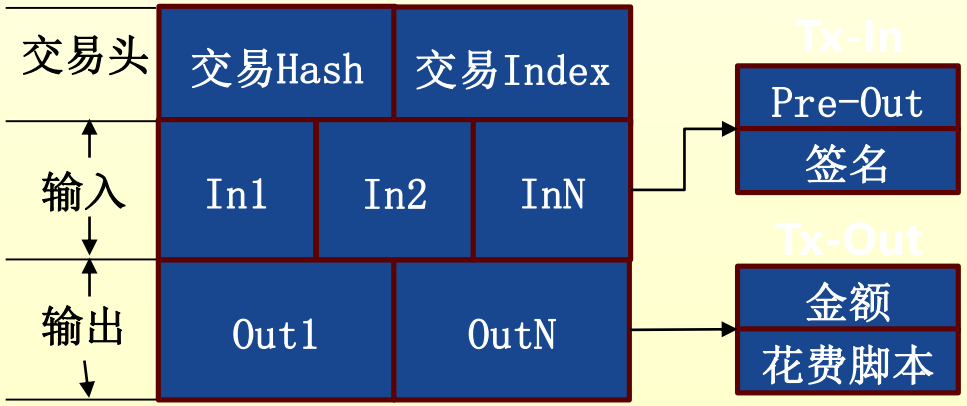
UTXO记账方法

UTXO(unspend transaction output)

- **所有交易花费的都是前置交易未被花费的输出**
- **所有正常的合法交易的输入都必须有一个对应的未花费的前置交易的输出**
- 使用一个用类Forth脚本语言编写的脚本去验证比特币的交易



交易结构



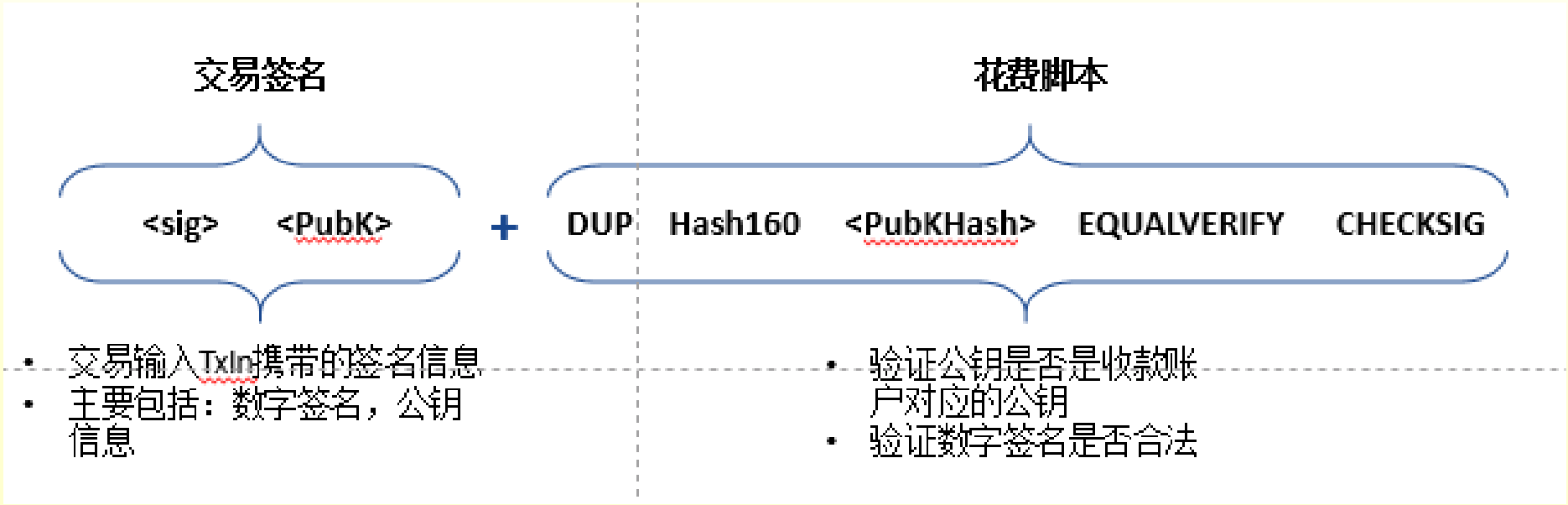
UTXO好处

相对于传统的账户模型，具有以下好处：

1. 账户数据库会不断膨胀，因为账户不会被删除，而UTXO数据库体积会小很多。
2. 由于只有未花费的输出会被保留，所以每一个比特币用户可以拥有几乎无限多的地址，提高了匿名性。
3. UTXO为高并发的交易带来可能，试想传统的账户模型，每个人的账户交易必须是线性的，无法并发。而现在每个人可能拥有多个UTXO，可同时发起多笔交易，实现了并发

脚本语言

脚本语言包含许多操作，但都故意限定为一种重要的方式——没有循环或者复杂流控制功能以外的其他条件的流控制。这样就保证了脚本语言的图灵非完备性，这意味着脚本的复杂性有限。



交易激励

1.交易费是一种激励，同时也是一种安全机制，使经济上不利于攻击者通过大量交易来淹没网络。
2.交易费是通过字节大小来计算，而不是花费比特币的多少。
3.目前交易均使用动态交易费，交易费的高低会影响交易被矿工处理（加入区块链）的优先级，交易费过低或为0的交易极少会被处理，甚至不会在网络上广播。
4.交易费不会存储在交易信息中，而是通过输出(output)与输入(input)的差值来替代（如果你要自己创建交易必须千万注意输出的金额大小，因为交易的差值无论大小全部会被矿工获得）

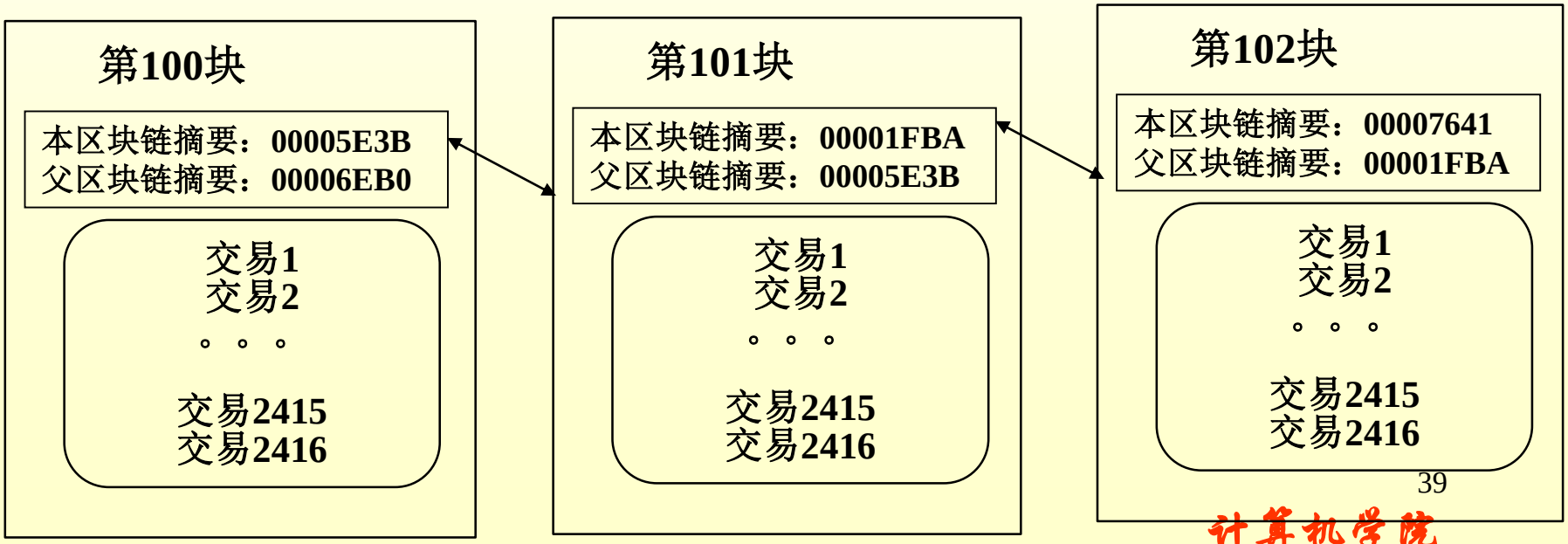
交易费 = SUM（所有输入） - SUM（所有输出）

5.预估当前合适的交易费

区块链结构

区块链有如下特点：

- 点对点非中心化
- 时序数据
- 集体维护
- 安全可信
- 可编程



区块的数据结构

大小	字段	描述
4字节	区块的大小	表示该字段之后的区块大小
80字节	输入计数器	区块头的组成字段
1-9字节	交易计数器	交易的数量
可变的	交易列表	许多交易

区块链头的数据结构

大小	字段	描述
4字节	版本	跟踪软件协议的更新
32字节	父区块哈希值	引用上一块的哈希值
32字节	Merkle树根	交易的Merkle根的哈希值
4字节	时间戳	区块产生的近似时间（UNIX）
4字节	难度目标	工作量算法的难度目标
4字节	随机数Nonce	工作量证明的计数器

交易数据结构

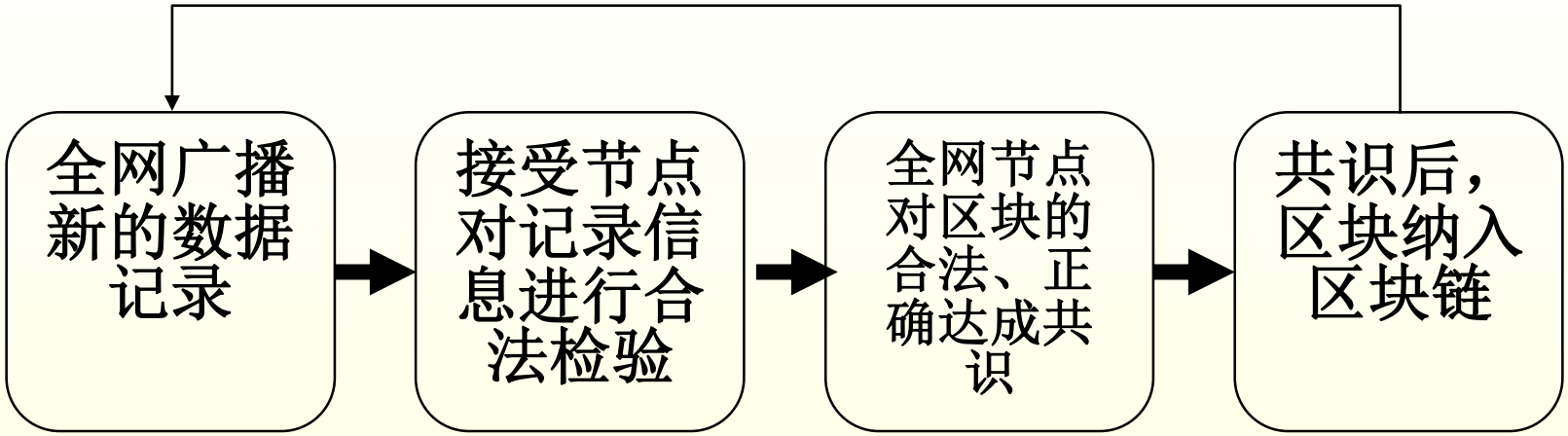
大小	字段	描述
4字节	版本	明确这笔交易参照的规则
1-9字节	输入计数器	被包含的输入的数量
不定	输入	一个或多个交易输入
1-9字节	输出计数器	被包含的输入的数量
不定	输出	一个或多个交易输出
4字节	时钟时间	一个UNIX时间戳或区块号

区块的构造

区块构造：

- 交易广播：每一笔交易需要全网广播，取得全网节点的验证后，才能进入区块链，这是信任的第一步
- 最先完成区块封装的节点把结果广播出去，其他节点停止构造，进行验证：
  - 区块链的数据结构在语法上有效
  - 区块头的哈希值小于目标难度，包含足够的工作量证明
  - 区块链时间戳早于验证时刻两个小时，允许时间错误
  - 区块大小在长度限制之内
  - 第一个交易是Coinbase交易
  - 验证区块内的交易是有效的
- 保证区块链的唯一性：6个区块链的缓冲，马太效应，全网节点都会选择最长链继续做块。

做块过程



- 平均每10分钟竞争产生一个区块，每个区块产生时间不一样
- 每个区块大小1M，每笔交易需要 250B 来存储数据，约可记录4194笔交易
- 因此大约TPS是每秒7笔交易
- 需等待6个后续块最终写入，需要60分
- 每2016个区块链会调整一次难度值，变难或变易，各节点按统一公式调整，差不多2周
- 总量2100万个，给挖矿人奖励一定的币，交易费约为0.00001个

区块链如何是可信的

- 区块链网络是公开的，节点知道过去发生的所有数据记录，之前的区块真实性是严格保证的
- 修改数据几乎不可能：要重头构造一条长度比之前的还要长的链，才能制造双重支付等虚假数据
- 多节点存储设置，各节点保存了大量数据完整数据
- 加密机制，采用哈希机制的多重加密手段
- 共识算法，各种共识算法对交易和构造新块进行确认和验证
- 经济规律，让破坏付出的代价远远大于能获得的收益

51%攻击

- 拥有超过全网一半算力下，有可能推翻已经确认过的交易，产生分叉，完成双花获利。
  - 修改自己的交易记录，如双重支付；
  - 阻止确认部分或全部交易。

- 经济学角度，攻击获取的收益要大于成本，51%攻击成本巨大，收益却很小，实际上会选择诚实的工作和理性的选择

如Ghash社区，接近51%算力，造成社区恐慌，矿工撤离，从而算力急剧下降。

关键环节

- 交易：交易被创建并签名之后将会被广播入比特币网络，然后每一个节点会验证并同时传播该交易。节点验证交易后，该节点可以选择验证完成的交易加入他创建的区块中。一旦挖矿成功，区块将上链，其中的交易将永远成为账本（区块链）的一部分。一段时间的交易，打包为一个区块，依次相连形成区块链
- 验证：

- 历史上发生过的所有交易信息分为两类，一类为“验证过”的交易信息，即已经被验证过的交易信息，它保存在一连串的blocks”里面。另外一类指那些还“未验证”的交易信息。
- 由于该节点保存了历史上所有的交易信息，它可以推算中在当时每个地址的账面余额，从而可以推算出该交易信息是否有效，即付款的账户里是否有足够余额。
- 交易可能有效也可能无效。就如同签支票一样，人们可能签订一张有效支票，也可能是“空头支票”，但是只有当金融系统承认该支票的有效性之后人们才能使用它。交易只有验证完比特币的所有权之后，才能进入“交易池”，等待节点收入并进行挖矿。

关键环节

- 同步：以区块为单位同步交易数据，如A节点块高度是200，B节点是210，则A向B请求同步201~210这10个区块。
- 打包：打包交易的节点（矿工）将获得币作为酬劳。因此，有大量节点想打包，为了区块链的唯一性，节点使用“竞争方式”争夺打包权。即挖矿，计算哈希值算法（不是预置的谜语）
- 出块：一旦有个节点算出规定值，则广播区块，其他节点收到后验证无误，就会停止竞争改区块，而改为竞争下一区块。
- 奖励：生产block的速度：平均2016个每两个星期，大约10分钟生产一个。生产block的奖励数量：开始每生产一个block奖励50BTC，每四年减半，2013年开始奖励25BTC，2017年开始奖励额为12.5BTC。另一部分来自交易手续费，每KB交易100~1000聪的手续费
- 意义：公平地分配初始币，虽然消耗了大量电力等资源，但与消耗资源去挖金矿洞一样。

关键环节

- 所有权：

所有权是通过数字密钥、比特币地址和数字签名三者确立的。比特币地址就好比银行卡号，数字密钥似银行卡密码，而数字签名就似个人签名。

- 和银行账户不一样的地方在于，银行会保存所有的交易记录和维护各个账户的账面余额，而bitcoin的交易记录则由整个P2P网络通过事先约定的协议共同维护。
- 没有一个地方维护每个地址的账面余额。它只能通过所有历史交易记录去实时推算账户余额。

最长链原则：

矿工可以在任意区块基础上计算下一个区块，但只有最长区块链上的区块才能获得系统的承认并得到挖矿奖励，这个奖励在该区块上增加99个新区块之后才能使用，是不分裂的重要机制。

拜占庭容错问题

由Lamport教授在1982年提出：　　解决错误节点模型

- 包围敌国的四周，依靠通信兵相互通信来协商进攻意向及进攻时间。困扰这些将军的问题是，他们不确定他们中是否有叛徒，叛徒可能擅自变更进攻意向或者进攻时间。在这种状态下，拜占庭将军们能否找到一种分布式的协议来让他们能够远程协商，从而赢取战斗？

其他共识机制：

- 工作量证明机制(Proof of Work, POW)
- 股权证明机制(Proof of Stake, POS)
- 瑞波共识机制(Ripple Consensus)
- 授权股权证明机制(DPOS)
- 基于交易的股权证明机制(TaPOS)

Pow共识算法

PoW协议：1993年 C.Dwork 和M.Naor在1993年论文中提出
1999年 M.Jakobsson 和 Ari Juels文章提出
应对经服务攻击和其他服务滥用的经济对策。

PoW原理：
不对称性，客户端有一定难度工作，验证方很容易检查客户端是否做了相应的工作。

PoW过程：

- ✓ 构建区块，组成交易列表，生产Merkle根
- ✓ 把Merkle根和其他字段组装为区块头，将区块头80字节作为哈希
- ✓ 不停变换区块头中随机数nonce,做双重SHA-256运算
- ✓ 与难度值对比，如果小于则工作量证明完成
  前导0个数越多，则代表难度越大。

区块的产生

- 工作量证明：让计算节点计算一组数学公式，这个过程被称为“挖矿”，其他参与节点可以用相关数学公式去验证这个值是否有效 。
- 比特币的挖矿：找到一个随机数Nonce，使得这个区块头的哈希值小于设定的难度值。
- 挖矿成功：矿工不断变化数据数计算哈希值，与网络目标值比较，如果小其最接近难度值，则向全网广播这一随机数Nonce，其他矿工验证通过，则区块成为新区块，该矿工获得一定数量的比特币。

所有矿工一起寻找答案的过程，每个矿工都有找到答案的可能

- 难度值根据平均10分钟的比值，调整变难或易，每产生2016个块调整一次

Pow过程

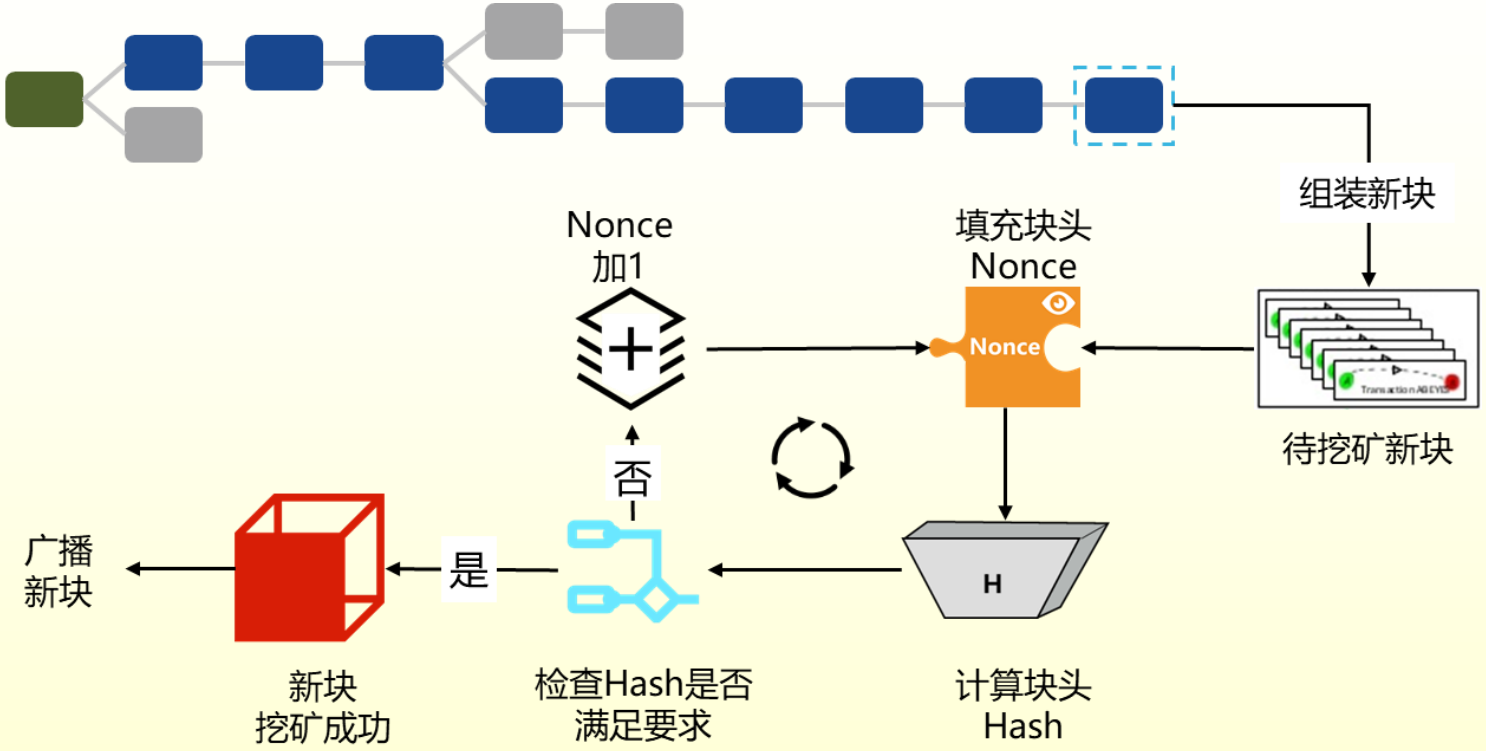
- 构建区块链，生产Coinbase交易，并与其他所有准备打包进区块的交易组成交易列表，通过Merkle树算法生产Merkle根。
- 组装成区块头，把区块头80字节数据作为工作量证明的输入
- 不停的变更区块头中的随机数，即nonce的数值，并对每次变更后的区块头做双重的SHA256哈希：

  SHA256[SHA256(区块头)]

- 将结果值与当前网络的目标难度值做对比，小于则解题成功，工作量证明完成。

安全性高，非中心化！

挖矿过程



概率共识，Nonce计算(挖矿)，最长链原则，6块确认

难度调整

难度要求：每一块块头的256位Hash值前置0的个数，可以根据历史块的出块时间计算所得。

隐私保护

传统隐私保护

区块链隐私保护

交易向全网公开，但公钥保持为匿名，
可以让每次交易都生产一个新地址。难以被追溯

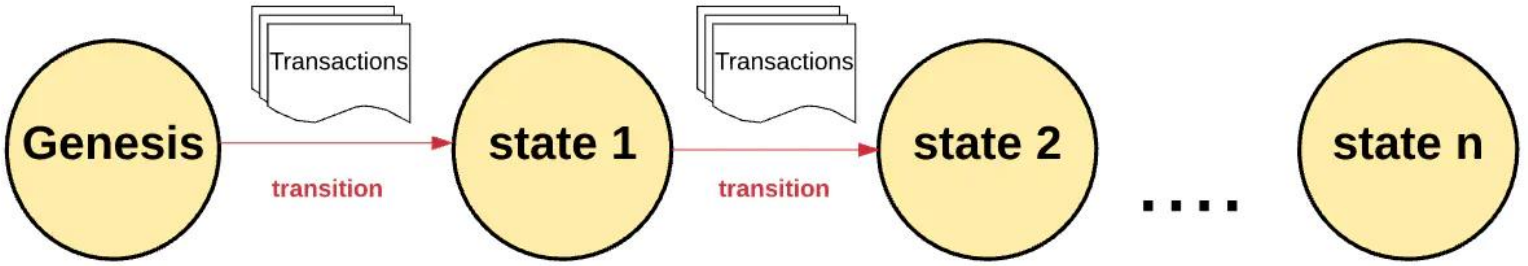
区块链2.0

区块链2.0

定义：区块链就是一个具有共享状态的密码性安全交易的单机(cryptographically secure transactional singleton machine with shared-state)

区块链1.0的问题

- 第一代区块链存在非图灵完备
- 没有保存状态的账户
- Pow挖矿带来的资源和效率问题。
- 更公平的激励问题
- ASIC矿机出现带来的中心化问题
- 共识算法比较单一



2.0的代表以太坊

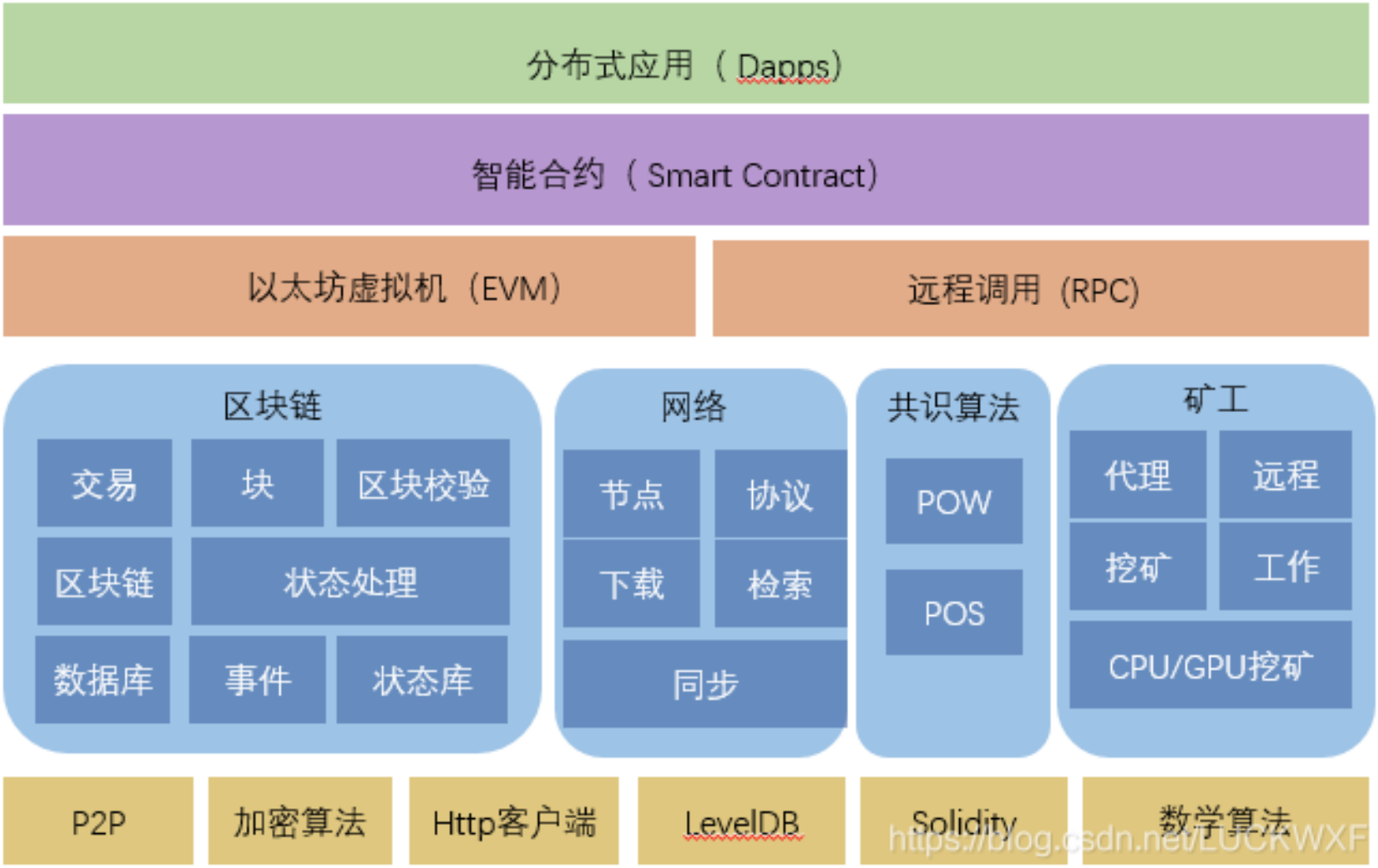
- 2013年比特币社交群里 Vitalik Buterin 发表以太坊白皮书
- 2014年募集到1843万美元开发资金
- 2015.7.30 以太坊正式启用

主要特点：

- 最大特色是结合智能合约机制，制定Solidity编程语言
- 使用内存需求较高的哈希函数，避免出现算力矿机
- 叔块激励机制，降低区块产生间隔为15秒
- 难度调整算法，一定的自反馈机制
- GAS机制，限制代码执行指令数，避免循环攻击
- 记录当前状态的哈希树的根哈希值到区块链，实现轻量级客户端
- 设计了虚拟机EVM
- 设计了MPT树

以太坊六层结构

体系结构



与区块链1.0的不同点

以太坊有更小的区块，比特币为1M

- 以太坊的区块大小没有限制，但是gas有个上限的，最大区块大小大约为1500000Gas，区块大小在22KB，从一个账户到另一个账户交易大约消耗21000GAS，每个区块大概包含70个交易。可调整，25~40TPS。

1M的数据全网广播需要1.5s左右。

以太坊的区块时间更短

- 以太坊区块间隔时间大约14秒，比特币是10分钟

以太坊虚拟机上可以运行智能合约

- 图灵完备语言，预先设定规则，交易发生时，作为输入参数到智能合约，按预先设定处理后输出结果。

以太坊有账户

- 以太坊账户有：序号，余额（拥有Wei的数量），Merkle根的哈希值，代码哈希值

以太坊有GAS机制

- 限制交易执行的工作量，EVM执行时，按照规则被消耗，执行结束由交易创建者设置，剩余GAS返回账户。

账户

以太坊把用户账户与智能合约均称为账户，每个账户有一对密钥，地址取自其公钥的最后20字节。由私钥和地址形成的密钥对均被编码和存放在一个密钥文件中，密钥文件采用JSON文本文件格式

- 外部账号：简称 EOA，是由私钥来控制的；
- 合约帐户：由合约代码来控制，且只能由一个 EOA 账号来操作；

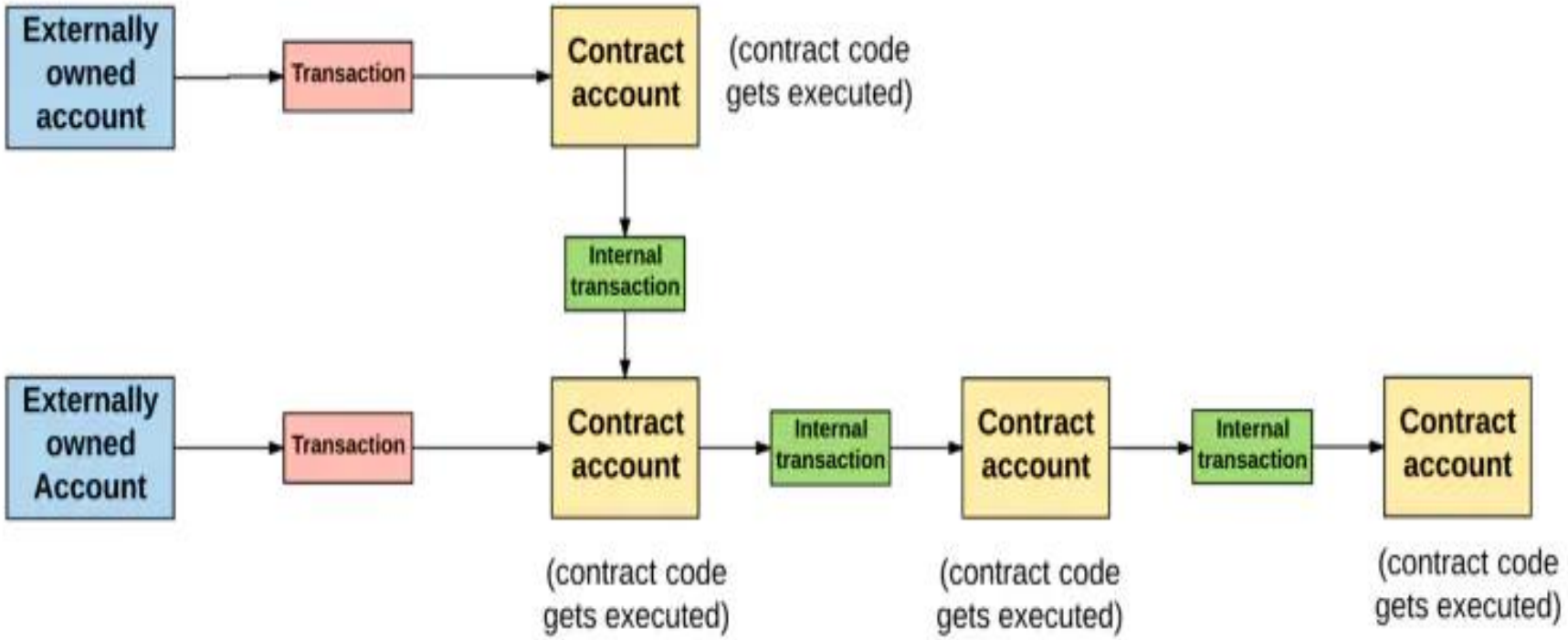
合约账户由其合约代码控制，从一个外部帐户到一个合约账户的消息会激活合约账户的代码。

账户状态

帐户状态：

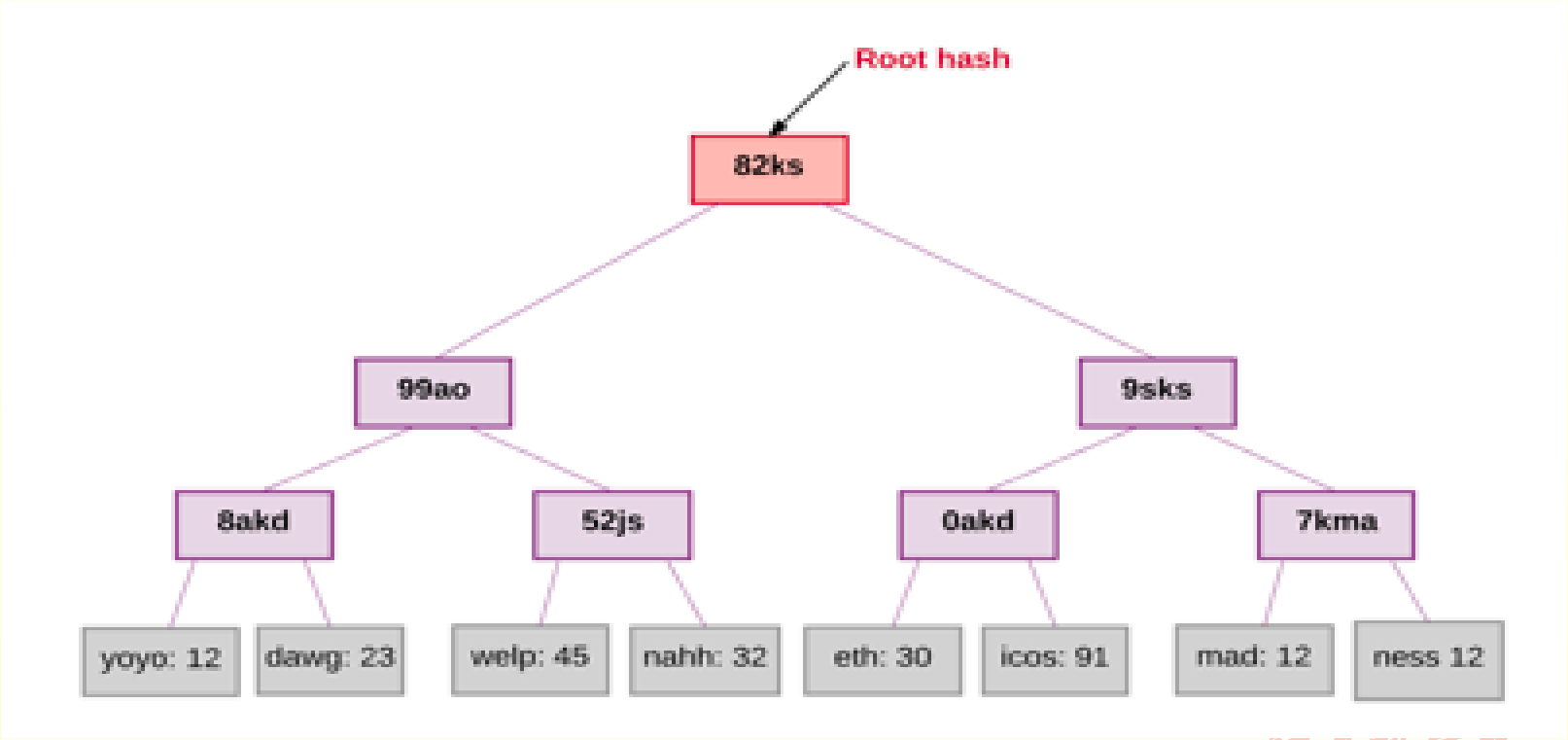
- nonce：如果帐户是一个外部帐户，这个数字代表从帐户地址发送的交易数量。如果帐户是一个合约帐户，nonce是帐户创建的合约数量。
- balance：这个地址拥有的Wei（以太坊货币单位）数量，每个以太币有1e+18 Wei。
- storageRoot ：一个Merkle Patricia树根节点的哈希，它对帐户的存储内容的哈希值进行编码，并默认为空。
- codeHash：EVM（以太坊虚拟机）的哈希值代码。 对于合约帐户，这是一个被哈希后并存储为codeHash的代码。对于外部帐户，codeHash字段是空字符串的哈希。

合约触发


Externally owned account
Transaction
Contract account
(contract code gets executed)
Internal transaction
Externally owned Account
Transaction
Contract account
Internal transaction
Contract account
Internal transaction
Contract account
(contract code gets executed)
(contract code gets executed)
(contract code gets executed)

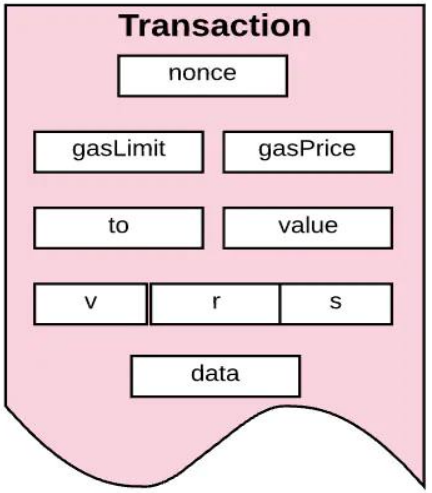
MPT树

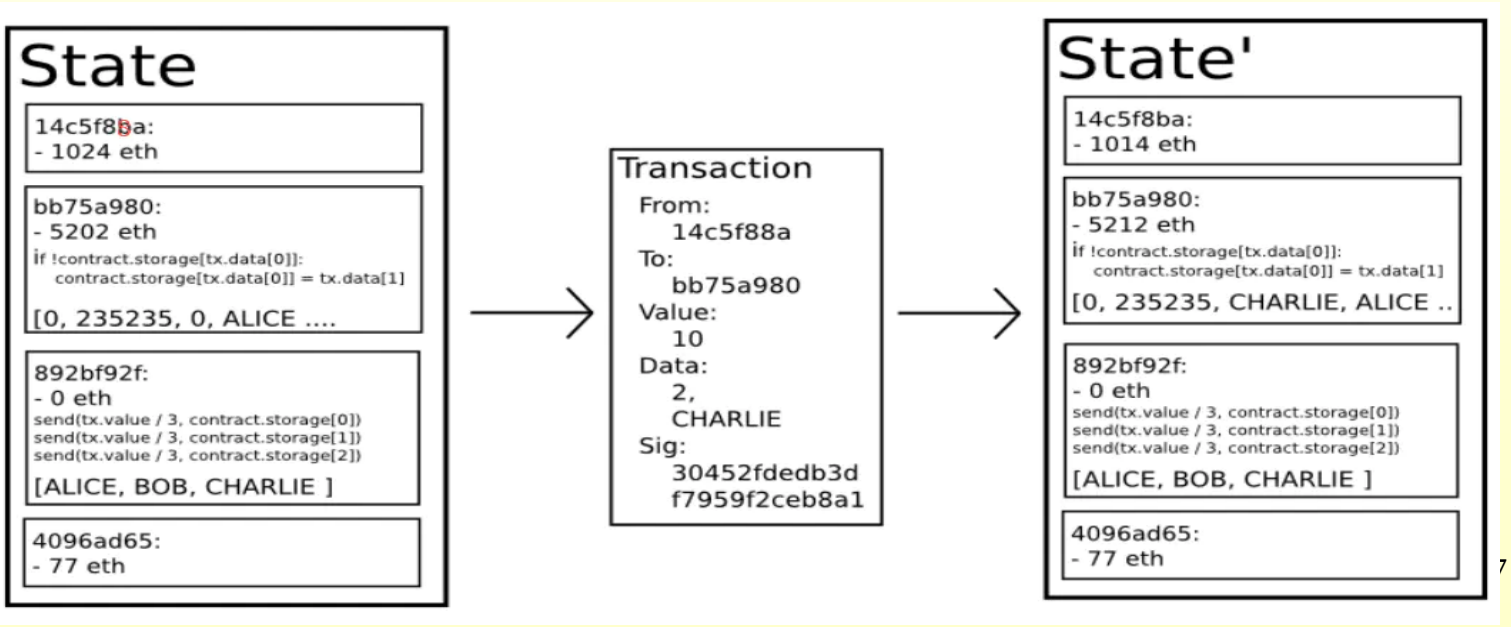
- Merkle Patricia树：树的底部数据是通过把我们想要存储的数据分割成块后而生成的。要求存在里面的值（value）都有一个对应的key。从树的根节点开始，key会告诉你顺着哪个子节点可以获得对应的值，这个值存在叶子节点



交易

- 交易包含以下内容
- 消息的接收者
- 一个可以识别发送者的签名
- 发送方给接收方的以太币的数量
- 一个可选的数据字段
- gasLimt值, 表示执行这个交易允许消耗的最大计算步骤
- gasPrice 值, 表示发送方的每个计算步骤的费用





消息

•合约有能力向其他合约发生“消息”，消息包含以下内容

•消息的发送者 (隐式)
•消息的接收者
•与消息一起传送的以太币的数量
•一个可选的数据字段
•一个 gasLimit值

由一个合约产生的而不是一个外部用户。 一个正在执行代码的合约，当执行到 CALL 代码时，会产生并执行一个消息。就像一个交易，一个消息会导致接收方的账户运行它的代码。因此，合约之间是可以互相发生作用的。

GAS费用

在以太坊网络上进行的每一笔交易都会产生费用，Gas不仅用于支付计算的费用，还用于支付存储的使用费用。

收费的目的就是使整个网络不会因用户的不当使用而变得负担过重，以太坊是一种图灵完备语言。这就允许了循环，如果没有费用，意图不良的人可以通过在交易中执行一个无限循环来扰乱网络。

每次交易，发送方都要设置一个Gas Limit和Gas Price。Gas Limit和Gas Price代表发送方愿意为执行交易支付的最大金额。

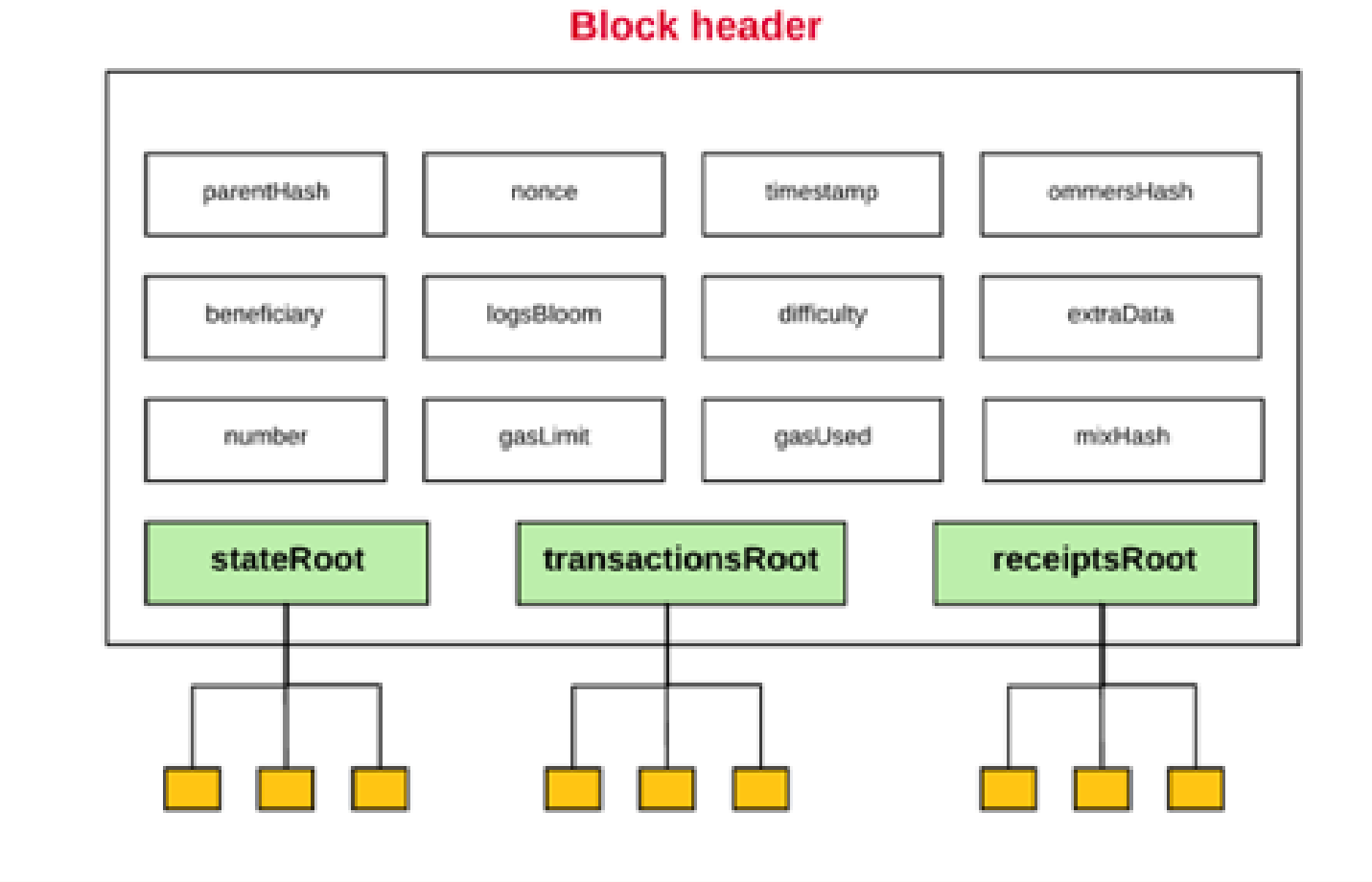
例如，发送方将Gas Limit设置为50,000，一个Gas Price设置为20 gwei。这意味着发送者愿意花费最多50,000 x 20 gwei，也就是：
1,000,000,000,000,000 Wei（0.001以太币）来执行这一交易

区块组织

- Block结构体主要分为Header和Body，Header相对轻量，涵盖了Block的所有属性，包括特征标示，前向指针，和内部数据集的验证哈希值等；Body相对重量，持有内部数据集。都以[k,v]形式单独存储在底层数据库中。
- BlockChain管理Block组成的一个单向链表，HeaderChain管理Header组成的单向链表，并且BlockChain持有HeaderChain。
- Merkle-PatriciaTrie(MPT)数据结构用来组织管理[k,v]型数据，它设计了灵活多变的节点体系和编码格式。
- StateDB作为本地存储模块，它面向业务模型，又连接底层数据库，利用两极缓存机制来存储和更新所有代表“账户”的stateObject对象。
- stateObject除了管理着账户余额等信息之外，也用了类似的两级缓存机制来存储和更新所有的State数据。

区块头

区块链头：存储三个不同Merkle树结构根节点的哈希，状态数，交易树和收据树。



区块头字段

- **parentHash**：父区块头的Hash值（这也是使得区块变成区块链的原因）
- **ommerHash**：当前区块ommers列表的Hash值
- **beneficiary**：接收挖此区块费用的账户地址
- **stateRoot**：状态树根节点的Hash值（回忆一下我们之前所说的保存在头中的状态树以及它使得轻客户端认证任何关于状态的事情都变得非常简单）
- **transactionsRoot**：包含此区块所列的所有交易的树的根节点Hash值
- **receiptsRoot**：包含此区块所列的所有交易收据的树的根节点Hash值
- **logsBloom**：由日志信息组成的一个Bloom过滤器 （数据结构）
- **difficulty**：此区块的难度级别
- **number**：当前区块的计数（创世纪块的区块序号为0，对于每个后续区块，区块序号都增加1）
- **gasLimit**：每个区块的当前gas limit
- **gasUsed**：此区块中交易所用的总gas量
- **timestamp**：此区块成立时的unix的时间戳
- **extraData**：与此区块相关的附加数据
- **mixHash**：一个Hash值，当与nonce组合时，证明此区块已经执行了足够的计算
- **nonce**：一个Hash值，当与mixHash组合时，证明此区块已经执行了足够的计算

Pow算法

以太坊目前的共识机制称为Ethash算法，提高内存级别难度，缓解用ASIC挖矿中心化的问题。算法：

$$(m, n) = \mathrm{PoW}(H_{\not n}, H_n, \mathbf{d})$$

m代表的是mixHash，n代表的是nonce，

Hn代表的是新区块的头（不包含需要计算的nonce和mixHash）

Hn是区块头的nonce，

d是DAG ，就是一个大数据集。

矿工可以随机抽取数据集中的部分并将它们放入一个数学函数中Hash出一个”mixHash”。矿工会重复生成mixHash直到输出的值小于想要的目标值nonce，**挖矿成功。**

挖矿

- 每一个区块中，通过区块头来生成一个seed，这个seed称为种子，种子只和当前的区块有关。
- 种子产生一个16MB的伪随机缓存。
- 基于上述的缓存，那么再生成一个1GB的DAG数据集。
- 矿工所做的事情，就是在数据集DAG中随机去选择元素，且对其进行散列的一个过程。
- 缓存和数据集DAG每增加30000个区块更新一次

- 轻节点可以仅基于缓存来校验一个交易的有效性
- 使用这个缓存，节点可以生成DAG“数据集，全节点需要保存

矿工奖励

一个矿工挖出一个区块的时候会获得奖励，包括：

- 为“获胜”区块提供的5 以太币静态区块奖励
- 区块中的交易在区块内所消耗的gas
- 纳入ommers作为区块的一部分的额外奖励

Ommers为了帮助奖励矿工纳入这些孤区块。必须在父区块的第6个子区块之内或更小范围内。

区块链3.0：可编程经济

区块链+DAO+人工智能+法律？

- 可扩展性：性能，规模化应用，高并发能力
- 互通性：跨网、跨链、协议互通
- 整体应用性：用户体验
- 技术进步：快速交易确认时间，低手续费，开发引擎，合约规模化产生，高安全性，大数据、大文件存储，分片、租赁、侧链，社区开发、群智和博弈、代码即法律等。

智能合约

发展趋势

Gartner 2015年10月9号的报告：

- **Gartner 认为，2016 年是数字化的时代元年。**
- **算法驱动的交易已经参与到我们的经济中， 在我们的企业、法律、经济和信托的规则下。**

新的自动交易会自己定义规则(智能合约)，并以此作为新经济范式的基础。Gartner 把它称之为 Programmable Economy，这会给现存经济带来巨大的变革。算法会以透明和开源代码的方式，在区块链（BlockChain）中自由设定，并且在银行、保险、市场、交易以及各种类型的金融工具中使用。

区块链：去中心化，人与机器的关系，全球信用的基础协议

智能合约起源

1994年左右，几乎与互联网（world wide web）同时出现，密码学家尼克萨博（Nick Szabo），提出了“智能合约”

“The Idea of Smart Contracts”

- 机器通过物理的密封自行控制财产，所以可以执行“合约”条款
- Szabo指出计算机代码可以代替机械设备，进行更复杂的数字财产交易
- 1998年，尼克萨博就设计出了一种叫“比特黄金”(bit gold)的去中心化的数字货币机制

✓ 电子数据交换(EDI)，
✓ 证券期权等合成型资产(synthetic assets)
✓ 智能资产：“智能财产可能以将智能合约内置到物理实体的方式，被创造出来”

定义1：
“智能合约就是执行合约条款的可计算交易协议”

维基百科定义

Smart contracts are computer protocols that facilitate, verify, or enforce the negotiation or performance of a contract, or that obviate the need for a contractual clause. Smart contracts usually also have a user interface and often emulate the logic of contractual clauses. Proponents of smart contracts claim that many kinds of contractual clauses may thus be made partially or fully self-executing, self-enforcing, or both. Smart contracts aim to provide security superior to traditional contract law and to reduce other transaction costs associated with contracting.

智能合约例子

- Alice从Bob处以每股50美元的价格，购买Bob在Acme Inc公司的100份股票

```
contract Option {
strikePrice = $50
        holder = Alice
        seller = Bob
        asset = 100 shares of Acme Inc.
        expiryDate = June 1st, 2016
function exercise ( ) {
                If Message Sender = holder, and
                If Current Date < expiryDate, then
                        holder send($5,000) to seller, and
                        seller send(asset) to holder
            }
```

智能合约的发展

- 发展缓慢，合约方无法直接观察与验证其他合约方的执行动作，只有让第三方审核各方合约执行的记录。

智能合约怎样控制实物资产保证有效地执行合约？

售货机通过将商品保存在内部控制财产所有权，可是计算机程序要怎么控制现实世界的现金、股份等资产呢？

计算机怎样执行这些条款以获得合约方的信任呢？

合约方应该不需要认可合约代码、以及解释和执行代码的计算机。不需要合约方亲自检查有问题的计算机。

区块链为完全数字化资产的记录和转移奠定了基础

结合带来的好处

智能合约通过协议与用户接口来促进合约的执行，

- 它不仅比传统“纸质”合约具有更大功能、生命力更强，
- 它还减少了交易在合约制定、控制协议和执行效能保障的人工花费与计算成本。
- 它还是形成“数字社会”主力军，是我们在互联网中形成安全、数字化关系的关键，使得我们可以在不信任的环境中保持协作。

应用场景

- 场景1：汽车交易

交易和贷款行为将嵌入程序以取代复杂流程和过程。如果贷款者不还款，智能合约将自动收回发动汽车的数字钥匙

- 场景2：出租房屋

所有的门锁都是连接互联网的。当你为租房进行了一笔交易时，达成的智能合约将自动地为你打开房门。你只需要存储在智能手机中的钥匙就能进入房屋。

智能合约的属性

- 合法性：代码符合法律规制，所控资产拥有所有权，且合法有效；
- 公信性：合约代码产生机制必须具有公信、权威性，结果可验证；
- 证据性：过程数据和场景必须被安全地存储，可被用于法律证据；
- 一致性：智能合约应与文本一致，经过专业人士制定审核；
- 智能性：能准确反映智力共识和智能执行；
- 可信性：静态产生和动态执行过程必须具有正确、安全、可靠和可监管；
- 可观察性：合约方能够通过用户界面去观察关于合约的所有状态
- 可验证性：合约方执行合约的过程是可验证；
- 自强制性：对于违反合约行为的制裁必须是强制性的
- 接入控制：合约相关的知识、控制、执行都应该作为资产保护起来，只有发生争执的时候，才把内容提供给第三方检验。

智能合约具有多面性：角色性，程序性，智能性，资产性

智能合约的编写

- 先用solidity编写合约

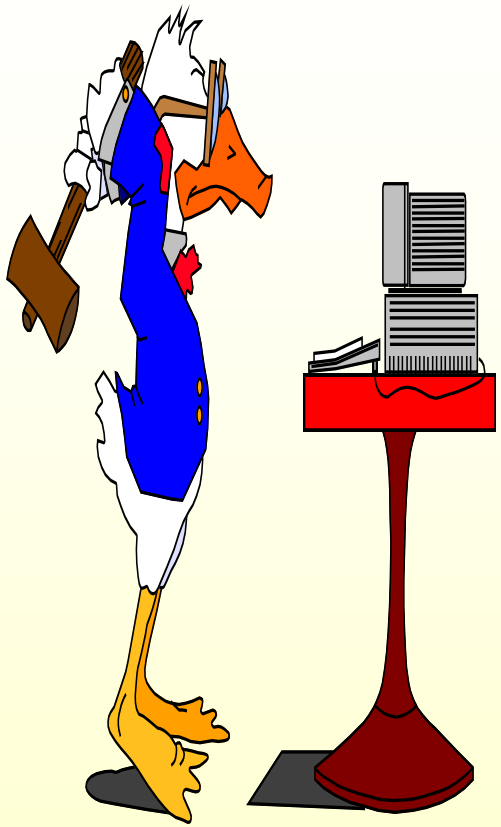
  contract test { function multiply(uint a) returns(uint d) { return a * 7; } }

- 得到字节码

  60606040526072806010600396000f3606060405260000357c01000000000000000000000000000000000000000000000000000000090048063c6888fa114603757603565b005b604b600480803590602001909190505506061565b6040518082815260200191505060405180910390f35b600060078202905060606d565b91905056

- 把这段代码的哈希存在区块链中，代码存在key-value数据库中，（key:code_hax,value:code）

智能合约的挑战



- 2016年6月17日发生的DAO攻击事件，由于DAO智能合约自身的漏洞，导致6000万美元从账号中流失。

- 智能合约的核心是算法合同（Algorithmic Contract），
- 智能合约作为“代码即合约”
- 智能合约将是需要大规模生产
- 智能合约是应用服务性的。

智能合约漏洞案例

案例1 The DAO事件

回顾： 2016年6月17日，运行于以太坊公有链中的The DAO项目中的智能合约遭受黑客攻击，此攻击被盗高达300多万以太币，并直接导致了以太坊的硬分叉。

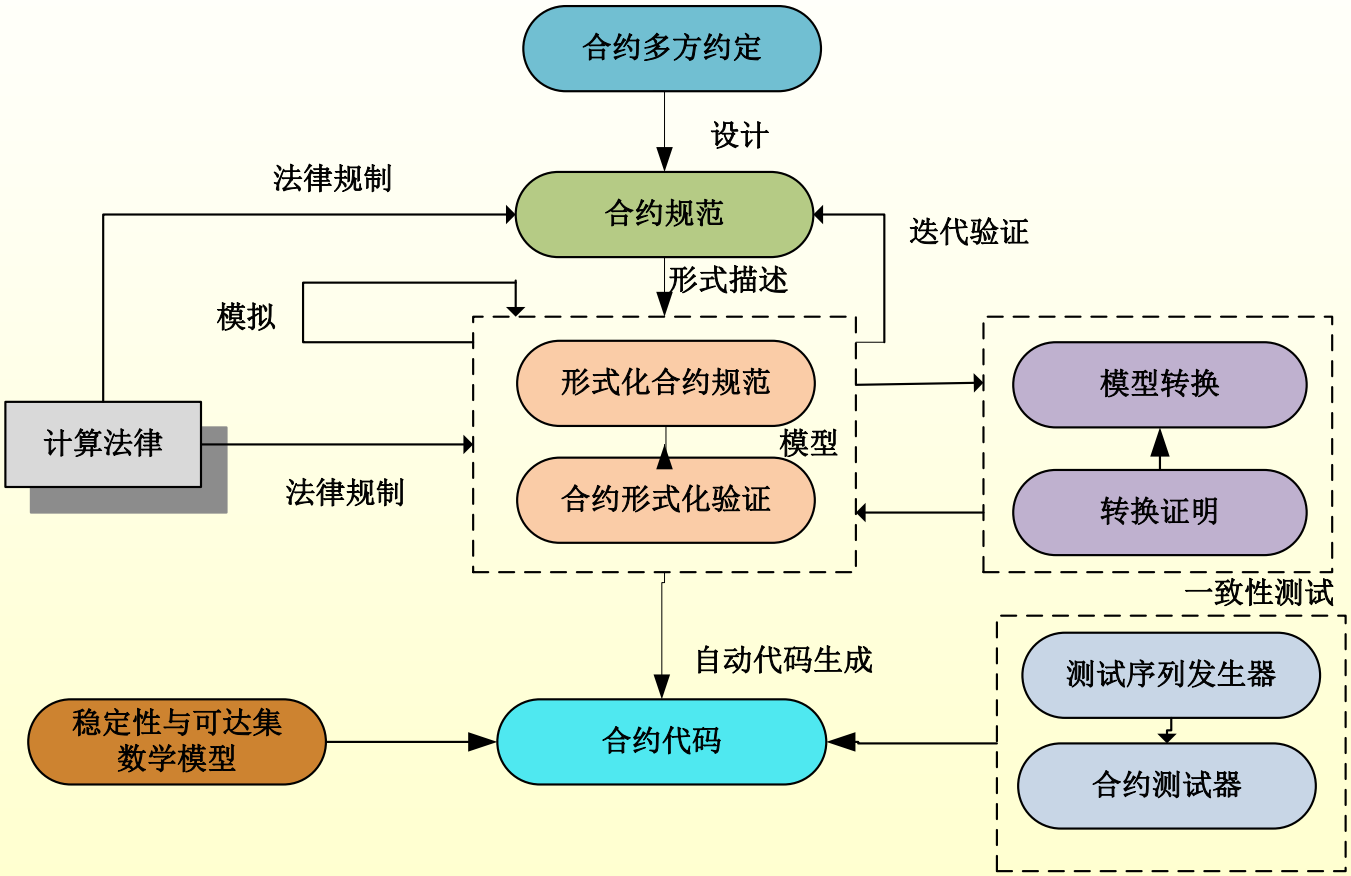
分析： 代码的主要问题出现在withdrawRewardFor方法中，该方法中的某个判断语句逻辑不严谨，导致攻击者可以通过一个递归函数将以太币转移到自己的账户中。

```
1  function withdrawRewardFor(address _account) noEther internal returns (bool _success) {
2      if ((balanceOf(_account) * rewardAccount.accumulatedInput()) / totalSupply < paidOut[_account])
3          throw;
4
5      uint reward =
6          (balanceOf(_account) * rewardAccount.accumulatedInput()) / totalSupply - paidOut[_account];
7      if (!rewardAccount.payOut(_account, reward))
8          throw;
9      paidOut[_account] += reward;
10     return true;
11   }
```

The DAO事件问题代码

智能合约工程

（Smart Contract Engineering）



智能合约建模方法

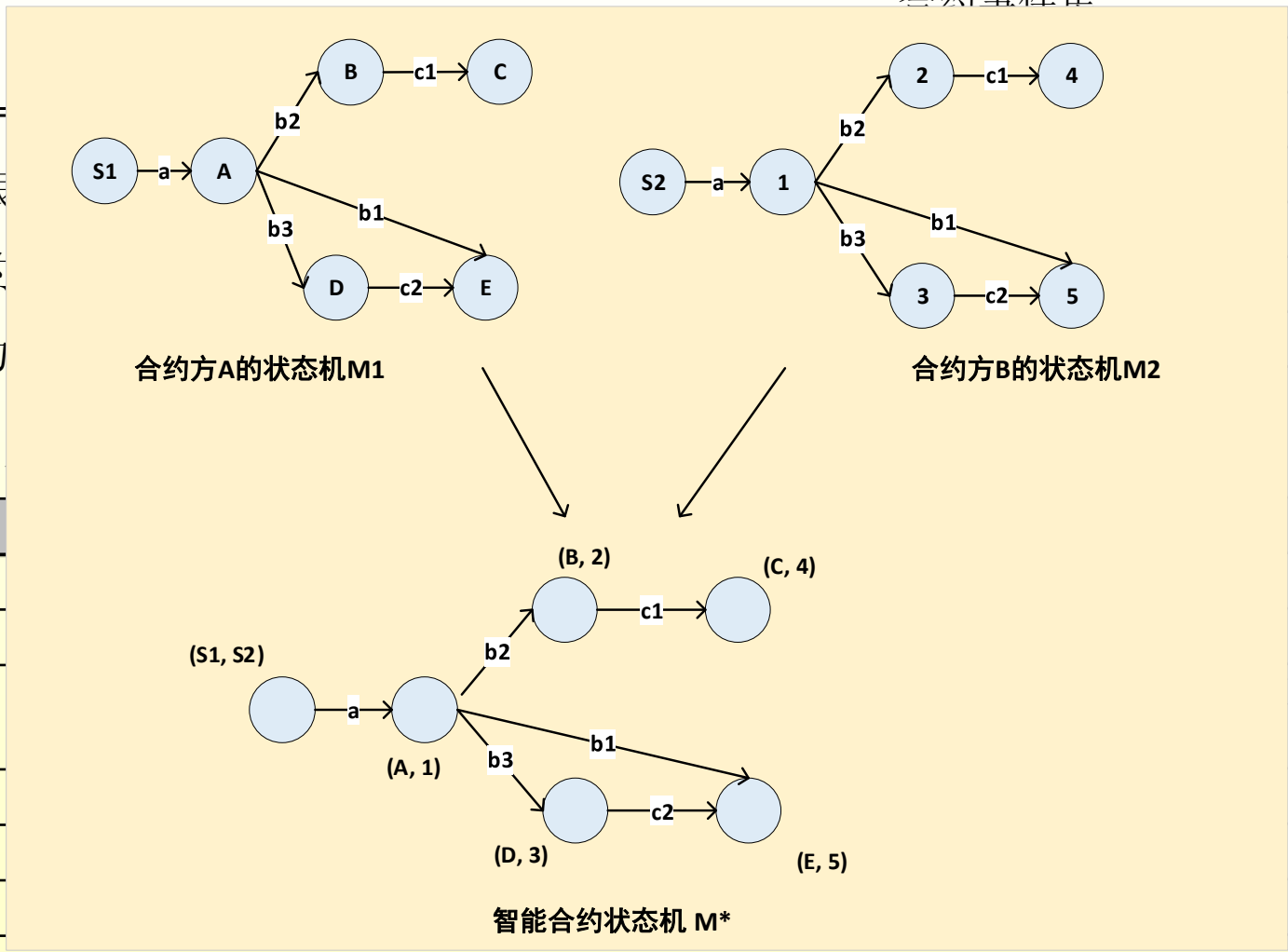
- 智能合约模型描述

- **M*=**

有限

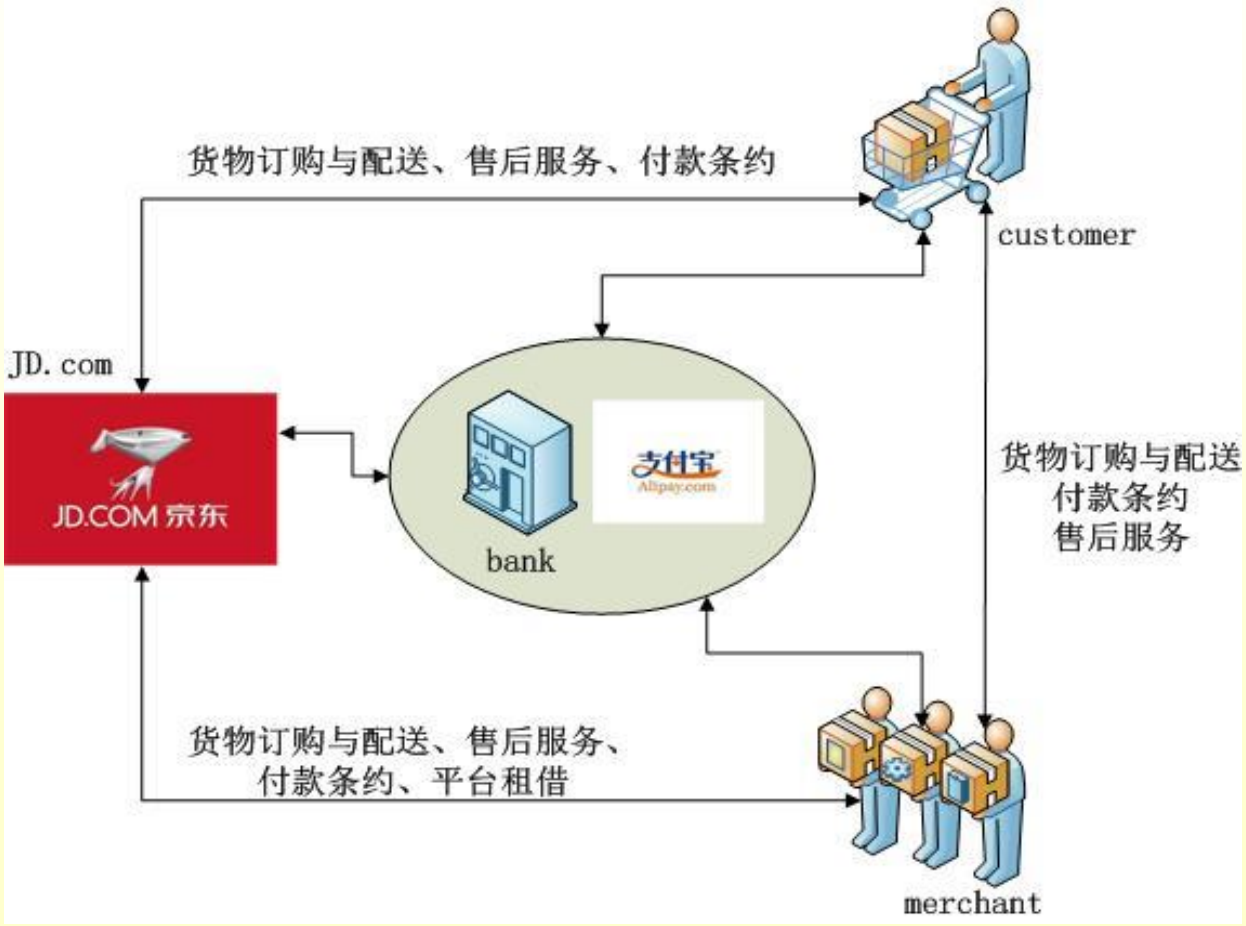
合约

S*为



状态	
s_1	
A	
B	
C	
D	
E	

- 网络购物平台例子


货物订购与配送、售后服务、付款条约
customer
JD. com
JD.COM 京东
bank
支付宝
Alipay.com
货物订购与配送
付款条约
售后服务
货物订购与配送、售后服务、
付款条约、平台租借
merchant

基本合约

- 货物订购与配送合约：
- Input：货物订购交易信息（货物信息goods、支付方式pay、配送方式distribution）
- 合约双方：A（the goods seller）、B（the goods buyer）
- 合约内容
- Begin
- IF goods are available AND pay is completed AND distribution is available
- Inform A to send the goods to B, set the terminator=timestamp + one week
- ELSE
- The transaction failed and return the money to B
- Wait one week for the acknowledgment message from customer
- IF acknowledgment message received
- Pay to merchant and quit
- IF TIMEOUT
- The transaction failed and return the money to customer
- END

售后合约

- Input：货物成交信息（货物信息item、支付方式pay、售后截止日期terminator）
- 合约双方：A（the goods seller）、B（the goods buyer）
- 合约内容：
- Begin
- While(timestamp <terminator){
- Wait for the feedback message from B
- IF A received message from B
- SWITCH(message){
- Case goods return message:
- IF the timestamp of the message is before terminator
- A wait for the goods
- IF A received the goods
- A return the money back to B
- ELSE
- A reject and quit
- Case goods exchange message:
- IF the timestamp of the message is before terminator
- A wait for the goods
- IF A received the goods
- A send the new goods to B
- Other:
- NULL
- }
- }
- Quit
- End

平台租借合约

- 平台租借合约
- Input：平台租借信息（租借信息message、支付方式pay）
- 合约双方：A（京东）、B（merchant）
- 合约内容：
- Begin
- IF message is confirmed and pay is completed
- Open the rights accessed to the platform to B and quit
- ELSE
- Reject and quit
- End

网购建模

```
byte money=100
byte user_money=0
byte shop_money=0
byte day=0
bool isSend=false
ltl { <>isSend }
active proctype user() {
        do
        ::  isSend -> atomic{
                                shop_money=100;
                                money=0;
                                break;}
        ::  (day>6)->{
                                user_money=100;
                                money=0;
                                break;
                        }
        ::  else -> day=day+1;
        od
}
active proctype shop() {
        do
        ::(day<7)->isSend=true;
        ::break;
        od
}
init{
        atomic{run user();run shop();          }
}
```

模型检测

jSpin Version 5.0

File Edit Spin Convert Options Settings Output SpinSpider Help | LTL formula

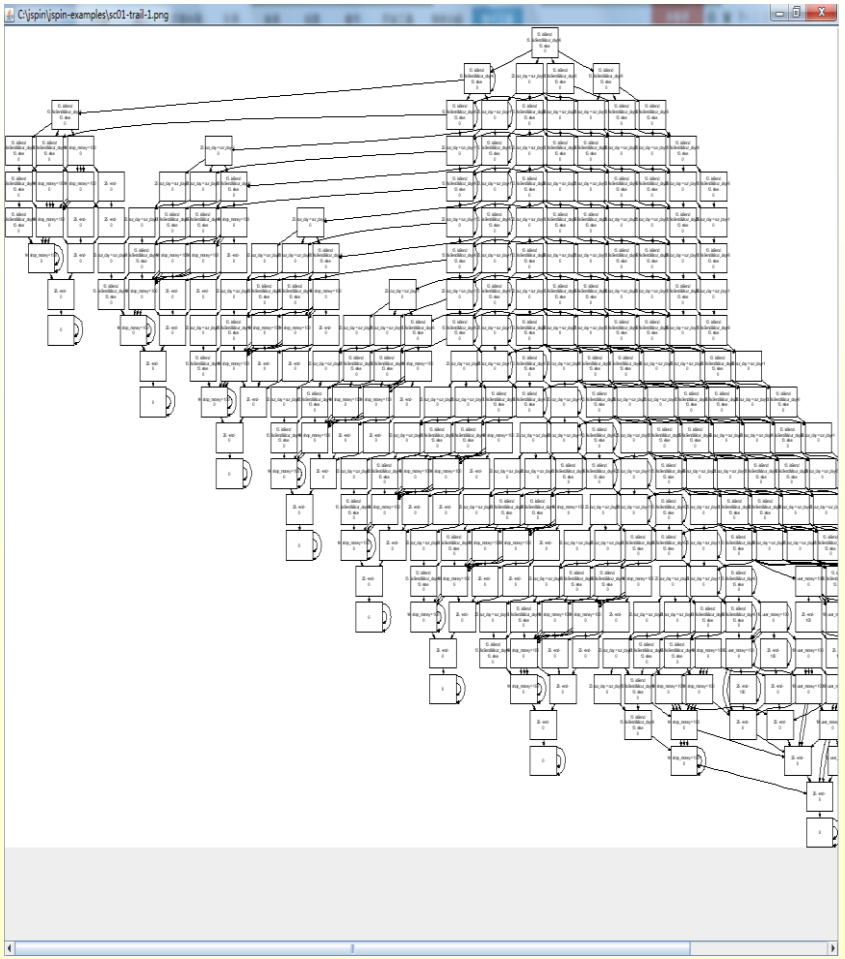
Open | Check | Random | Interactive | Guided | Weak fairness | Safety | Verify | Stop | Translate | Load | LTL name | SpinSpider | Maximize

ssc.pml

```
byte money=100
byte user_money=0
byte shop_money=0
byte day=0
bool isSend=false

ltl { <>isSend }

active proctype user() {
    do
    ::  isSend -> atomic{
            shop_money=100;
            money=0;
            break;}
    ::  (day>6)->{
            user_money=100;
            money=0;
            break;
        }
    ::  else -> day=day+1;
    od
}

active proctype shop() {
    do
    ::(day<7)->isSend=true;
    ::break;
    od
}

init{
    atomic{
        run user();
        run shop();
    }
}
```

```
'gcc-4' □□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□
'gcc-3' □□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□
  0:    proc  - (:root:) creates proc  0 (user)
  0:    proc  - (:root:) creates proc  1 (shop)
  0:    proc  - (:root:) creates proc  2 (:init:)
ltl ltl_0: <> (isSend)
0 user: 1)  else
0 user: 1)  day = (day+1)
Starting user with pid 3
  4:    proc  2 (:init::1) creates proc  3 (user)
Process Statement          day
2 :init ini run user()     1
Starting shop with pid 4
  5:    proc  2 (:init::1) creates proc  4 (shop)
2 :init ini run shop()     1
3 user: 1)  else           1
  7:    proc  4 (shop:1) terminates
3 user: 1)  day = (day+1)  1
3 user: 1)  else           2
3 user: 1)  day = (day+1)  2
0 user: 1)  else           3
0 user: 1)  day = (day+1)  3
3 user: 1)  else           4
0 user: 1)  else           4
0 user: 1)  day = (day+1)  4
0 user: 1)  else           5
0 user: 1)  day = (day+1)  5
0 user: 1)  else           6
3 user: 1)  day = (day+1)  6
0 user: 1)  day = (day+1)  7
3 user: 1)  day>6          8
3 user: 1)  user_money = 1 8
Process Statement          day        user_money
0 user: 1)  day>6          8          100
3 user: 1)  money = 0      8          100
Process Statement          day        money      user_money
0 user: 1)  user_money = 1 8          0          100
0 user: 1)  money = 0      8          0          100
 36:    proc  3 (user:1) terminates
 36:    proc  2 (:init::1) terminates
 36:    proc  1 (shop:1) terminates
 36:    proc  0 (user:1) terminates
5 processes created
```

```
bin\spin644_windows32.exe -g -l -p -r -s -X  -u250 ssc.pml ... done!
bin\spin644_windows32.exe -g -l -p -r -s -X  -u250 ssc.pml ... done!
bin\spin644_windows32.exe -g -l -p -r -s -X  -u250 ssc.pml ... done!
```



Thanks !