网络出版时间：2018-01-11 17:24:50
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20180111.1724.011.html

软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005500]

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

区块链的安全检测模型*

叶聪聪[1]，李国强[1]，蔡鸿明[1]，顾永跟[2]

[1](上海交通大学软件学院,上海 200240)

[2](湖州师范学院,浙江湖州 313000)

通讯作者：李国强, E-mail: li.g@sjtu.edu.cn

摘要：区块链[1]是去中心化交易平台比特币的底层技术.该系统由分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等计算机技术组成,它的安全性受到广泛关注.目前的研究大多使用数学证明的方法分析每个攻击的作用,本文提出了一种新颖的根据区块链的结构来评估和检测安全性的方法.在真实环境下当一个区块连接超过 6 个区块后,该区块的内容基本无法改变,被认为是稳定状态,分支产生的概率逐渐降低,因此整个系统的状态是无限循环的.该方法通过分析每个结构到达稳定状态的概率来评估系统的安全性,并通过实验分析了攻击力度,攻击状态和实验循环次数之间的关系,验证了该方法的可行性和有效性.

关键词：51%攻击;挖矿过程;区块链;协议安全;安全检测

中图法分类号：TP311

中文引用格式：叶聪聪,李国强,蔡鸿明,顾永跟.区块链的安全检测模型.软件学报,2018,29(5). http://www.jos.org.cn/1000-9825/5500.htm

英文引用格式：Ye CC, LiGQ, Cai HM, GuYG. Evaluating the security of blockchain. Ruan Jian XueBao/Journal of Software, 2018,29(5) (in Chinese).http://www.jos.org.cn/1000-9825/5500.htm

Evaluating the Security of Blockchain

YE Cong-Cong[1], LI Guo-Qiang[1], CAI Hong-Ming[1], Gu Yong-Gen[2]

[1](School of Software, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[2](Huzhou University, Huzhou313000, China)

Abstract:Blockchain is the basic technology of bitcoin, which is a decentralized peer-to-peer transaction system. Blockchain consists of distributed storage, peer-to-peer transfer, consensus mechanism and encryption algorithm. The security of blockchain is always the focus of people's attention. Many researches use mathematic methods to analyze the impact of each attack in blockchain. But types of attacks in blockchain have not been fully identified. Evaluating the security of blockchain by analyzing the impact of each attack separately is incomplete. In this paper, we propose a method to detect and evaluate the security of each state in blockchain by simulating blockchain's process. This simulation method uses two strategies: attacking algorithm and honest algorithm to get all states of blockchain including attacking states. When a block contains illusory transactions connects with more than six blocks, this state of blockchain is regarded as attacking state and others are called honest state. According to simulating process, we can analyze the probability that honest state becomes attacking state. When the probability exceeds a high value, people will get a warning, they can wait a longer time to accept the transactions in order to defend being attacked and improve the security of blockchain. Some experiments are also carried to measure this method and we use various forms to analyze and show these results, which verify our method is correct and feasible.

Key words:51%-Attack;Mining;blockchain; protocol security; security evaluation

自从 2008 年中本聪提出了去中心化的点对点交易平台比特币[2]，它的底层技术区块链就一直备受关注.

* 基金项目：国家自然科学基金重点项目(61732013)；浙江省重点研发项目(2017C02036)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61732013); Key R&D Project of Zhejiang Province(2017C02036).
收稿时间：2017-07-01；修改时间：2017-08-29；采用时间：2017-11-21; jos 在线出版时间：2018-01-09

区块链技术[3]提供了一个去中心化的，开放的拜占庭问题解决机制，为下一代互联网技术包括匿名在线支付，汇款等交易的数字资产提供基础支持[4].区块链已经被广泛使用在物流跟踪，分布式存储，在线交易等方面，因此检测和证明它的安全性是十分重要的.

实际上，在区块链平台中有各种各样的攻击.例如 51%的攻击，日蚀攻击和物理攻击等等[5].目前大部分的研究使用数学的方法分析每个攻击的影响力[6]，从而来评估区块链的安全性.Heilman 等[7]使用了一个详细和充分的数学方法来分析日蚀攻击的作用，同时他们使用类似的方法实现了对比特币中双重支付攻击的评估和检测.区块链中的攻击还没有被完全发现，仍然有很多学者在研究其中可能存在的攻击类型.因此单独分析每个攻击的作用是不全面的，因此我们需要一个方法来完整全面的评估区块链的安全性.

为了解决先前提出的问题，我们提出了一个新颖的基于区块链状态的安全评估方法.我们构造了一个模型来模拟区块链的运行过程.将 51%攻击当成其中唯一的攻击方式，同时使用两种算法来模拟诚实矿工和攻击者的行为.通过多次运行该模拟程序，我们记录了在不同参数环境下，系统总的状态数目和攻击数目.我们将攻击状态作为研究目标，分析每个状态变成攻击成功状态的概率.当该概率达到某个值时，可以向区块链中的用户发送提醒，延长交易确认的时间，从而降低攻击的风险.

根据先前的研究，如果一个区块后连接了足够长的区块，则存储在该区块的信息将几乎不能被更改.该结构可以被称为稳定状态，如果这个区块中包含了虚假的交易信息，则该状态被称为攻击状态，否则为诚实状态.在实际运行过程中，区块后面连接 6 个区块后，则该区块达到稳定状态.因而我们可以认为区块链的状态是一个循环，且状态数量是有限的.如果我们能获得区块链中大部分的状态结构，我们就能通过分析每个结构达到攻击状态的概率，从而评估系统的安全性.本文的主要工作提出了一个区块链模拟的模型并用 Java 实现了该过程.从该模拟过程中，我们可以获得区块链的大部分状态和攻击成功的数目，验证了区块链状态是有限的.同时分析了攻击数目和状态数目之间的关系，并举例说明了从一个状态到稳定状态概率的计算方法，验证了该安全检测模型的可行性.

本文余下部分按如下组织：第二节介绍一些后文将用到的一些基础概念，挖矿过程和共识机制.第三节介绍 51%攻击策略，攻击者策略，诚实矿工策略的定义和区块链的应用.第四节介绍实验的方法，包括模拟运行算法，攻击者和诚实矿工挖矿算法以及相关方法的比较.第五节介绍了实验的结果，并用多种方式展示了区块链状态有限，攻击数目，状态数目以及攻击力度之间的关系，并举例介绍了概率计算的方法.第六节总结全文，并展望未来工作.

1 预备知识

这节将会介绍关于区块链的一些基本概念，包括区块链的定义，挖矿过程，共识机制.

1.1 区块链和挖矿

区块链是一个分布式的存储技术，用来存储比特币中的交易信息.每个区块都包含一个唯一的 ID，前一个区块的 ID，交易信息和时间戳等.区块链解决了古老的拜占庭将军问题，提出了去中心化的信任机制.挖矿[8]是区块链中十分重要的过程，矿工会根据一定的规则收集一段时间内的交易信息，例如选择小费较高的交易信息.然后矿工使用 SHA256 算法计算区块中交易数据和一个幸运数字获得一个字符串，当字符串前面的零的个数小于等于系统设置的零的个数时，认为挖矿成功.该矿工会被奖励一定金额的比特币，这些比特币是系统新产生的，也是比特币产生的唯一途径，类似于银行的货币发行.同时该矿工会把该区块发送给它的邻居节点来验证区块的正确性，然后将该区块连接到对应的区块后面.

如果同一时间间隔中出现了两个或两个以上的区块，则区块链将会出现分支，类似于树状结构[9].其它的矿工可以将下一个区块连接到它们中的任何一个节点.为了保持全局一致性，协议规定只会承认最长链上的交易，而其它分支上的区块交易信息将会被忽略.在实际环境中，挖矿成功的平均间隔时间为 10 分钟，出现分支的概率会非常低，平均 60 个区块才会出现一次分支的情况[10].攻击者正是利用了分支[11]的特性来篡改交易的信息，攻击区块链.为了解决这些问题，提出了共识机制.共识机制运用数学的方法解决了信任问题.

1.2 共识机制

区块链是密码学和信息技术在数据存储上的新颖应用,它们将会引起企业管理上的变革[12].区块链最重要的特性就是一系列协议,它们被称为共识机制.目前还没有完全能够保证一致性的方法,任何参与者都有可能消费同一份比特币多次,这就是著名的双重花费问题.

拜占庭容错协议可以用来解决一致性问题,该协议类似于投票机制.每个参与者都可以通过投票来表达自己的想法.在区块链中,每个矿工都会收集一段时间内交易信息,并进行验证,例如检查交易信息是否完整,交易的收入是否大于等于支出,比特币是否被使用等,并会进行工作量证明操作.当验证无误且工作量证明完成时,该节点会向邻居节点传递该区块信息,邻居节点根据规则来判断验证是否正确并根据协议选择连接的节点,对账本信息进行更新操作.因此只要区块链中诚实矿工超过一半时,就能保证区块信息的正确性.任何人都可以成为矿工,参与该投票过程.如果该过程过于简单,则攻击者很容易干扰系统的一致性,因此提出了工作量证明的方法.工作量证明就是用结果来代替过程的工作量,类似于毕业证书.区块链中的工作量证明需要昂贵的计算资源和特殊的挖矿机器.如果某个矿工完成了工作量证明,说明它是攻击者的概率低或者说明攻击者将需要花费更长的时间来攻击区块链,降低了攻击者存在的可能性.

2 问题定义

区块链的安全的受到很多因素的影响,例如不同的攻击类型,网络的状态,科学发展的进程等等.许多研究证明当一个区块连接足够多的区块后,该区块的交易信息几乎不能被更改.因此区块链是一个无限循环的结构.如果能找到一个循环中的状态信息,分析每个状态的安全情况,就可以对整个区块系统的安全进行评定.本节介绍了安全评定模型中的攻击类型,诚实矿工和攻击者各自策略的定义.

2.1 51% 攻击的定义

区块链中最著名的攻击方法是 51%攻击.51%攻击指攻击者掌控了整个区块中 51%以上的计算资源,攻击者可以阻止新的交易被确认,使用户的交易进程停止[13].攻击者可以更快的完成交易信息的确认,使虚假的交易信息更多地出现在最长链上.掌控越多的计算资源,攻击就会越容易出现.51%攻击可以让攻击者更改已有的交易信息,从而产生双重支付问题.

中本聪提出了比特币的原理,计算了不同攻击力度下成功攻击的概率[2].诚实链和攻击链的速率类似于二项式随机游走.一个攻击链能够追上诚实链的概率如下所示:

$$q_z = \begin{cases} 1 & p \le q \\ (q/p)^z & p > q \end{cases} \quad (1)$$

其中 p 代表诚实矿工找到下一个区块的概率,q 是攻击者找到下一个区块的概率.q_z 指攻击者改变当前区块交易内容的概率.

从概率层面分析,如果攻击者攻击速率比诚实矿工高,则攻击者一定可以更改某个区块的交易内容.然而事实上攻击概率跟很多方面有关,例如网络中计算资源的改变,工作量证明的难度,矿工之间交易信息的同步等.为了更全面的评估整个系统的安全性,我们通过模拟整个系统的运行,并统计分析区块链的每个状态来进行评估.

2.2 攻击策略的定义

区块链是一个去中心化的系统,每个人都可以维护或者参与该系统的运行.区块链具有匿名性[14],系统中的用户无法知道区块中是否包含虚假交易信息,然而攻击者可以清楚知道区块的状态.攻击者们可以将新产生的包含虚假交易信息的区块连接到最有利于自己的区块后面.攻击者的选择策略定义如下:

$$R = \begin{cases} \max \sum_{V_i \in U_{attack}} child(v_i) & \sum_{i=1}^{n} V_i \geq 1 \\ \max \sum_{V_i \in U_{all}} child(V_i) & \sum_{i=1}^{n} V_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

R 表示攻击者在当前区块链中选择连接的区块.V_i 是区块链中的每个区块.函数 $child$ 用来判断节点 V_i 是否有子节点.当区块中存在攻击区块时，攻击者会将新的区块连接到攻击区块后连接区块最长的链.如果不存在攻击区块，则选择最长的分支.

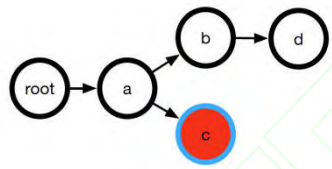


图 1 攻击者策略案例示意图

图 1 是从攻击者的角度看到的区块链的状态图.实心节点 c 表示该区块含有虚假的交易信息.其余节点是验证正确的区块.在此状态下，攻击者会将新产生的区块连接到 c 节点后，这样会使 c 节点的交易信息更不会被更改，加大攻击成功的概率.c 节点后面连接的区块越多，内容越不容易被更改，当一个含有虚假交易信息的区块到达安全状态时，即认为攻击成功.无论攻击的类型是什么，攻击者的目的类似.本文使用 51%攻击作为唯一的攻击类型,当攻击类型改变时,也可以采取类似的方法,仅改变普通状态到攻击成功状态概念计算方法即可.

2.3 诚实矿工策略定义

对于诚实矿工来说，每个区块的类型是未知的[15].在区块链中，系统只认可最长的链的区块中的交易信息.概率层面分析，诚实的矿工可以将新产生的节点连接到任意区块下，但是会尽可能的选择最长链的叶子节点.当有多个叶子节点所属链的长度相同时，攻击者将以相同的概率连接到其中的某个节点上.每当节点的深度递减一层，该节点被选择的概率就会降低一半.公式（3）来所有节点被选中的概率之和等于 1.用公式（4）来计算节点 p_{ij} 被选中的概率与它所处的树的层次的关系.

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (1/2)^{(L-i)} p = 1 \quad (3)$$

$$p_{ij} = (1/2)^{(L-i)} p \quad (4)$$

L 是整个区块链的长度.P 为最长链的叶子节点被选中的概率，会随着区块链的状态不同而改变.在实际运行环境中，诚实矿工选择叶子节点之前的节点的概率将会更低.为了模拟方便，将递减的概率设置为 0.5[8].诚实攻击者选择的策略比攻击者更复杂，因为它们无法获知每个区块的状态.越靠近根节点，被选择的概率越低.在图 1 的结构下，节点 d 被选中的概率最大，该概率只和节点的深度有关.

3 实验方法

本节将会介绍区块链系统模拟算法，攻击策略，并用数学的方法证明区块链中的状态数目是有限的.区块链是一个十分庞大和复杂的去中心化的系统，它用数学的方法解决了双方之间的信任问题.但其中仍然存在很多问题，例如双重支付，51%攻击，日蚀攻击等等.本文使用模拟的方法获得整个过程的状态，并对每个状态进行分析，从而来评估整个系统的安全性.

3.1 挖矿过程模拟算法

本文采用树型结构来代表区块链.区块链中的节点有两种类型：攻击节点或诚实节点.设置一个概率代表

攻击力度即攻击者拥有的计算资源比例，攻击力度与下一个新区块的类型有关.根据不同的区块的类型，将采用不同的连接策略来选择连接的节点.算法 1 是挖矿过程模拟的算法：

算法 1: 获得区块链模拟过程中的全部状态
输入：攻击力度 P
输出：区块链中的所有状态 S
1.创建一个诚实节点作为区块链的初始化过程
2.循环
3.根据攻击力度创建一个新的区块
4.如果新的区块为诚实节点
5.使用算法 2 //诚实矿工策略选择下一个连接节点
6.否则
7.选择所有攻击节点所在最长链的叶子节点进行连接，若没有攻击节点，则选择最长链的叶子节点.
8.将新的节点连接到选择的节点上
9.如果该状态与已出现的状态都不相同
10.将该状态保存在集合 S 中
11. 如果一个结构变成了安全状态或者攻击状态
12.重新用一个诚实节点初始化区块链
13.当区块链中的状态数目收敛时，停止循环
14.返回模拟过程中所有的状态集合 S

算法 1 忽略了工作量证明和时间戳服务等.因为这些复杂的过程和我们的研究目标没有联系.模拟过程中只要有一个区块达到稳定状态，则该状态之前的所有节点都可以被剪掉，因为它们的内容都无法被更改，从而降低问题的复杂程度.在每次循环中，我们都会将产生的状态与已有的区块状态进行比较，如果两个状态中的树的分支相同，包括节点数目，分支深度等，则这两个状态相似.因为分支深度有限，且根据协议特征，区块链中所有的状态数目与攻击力度，攻击方式无关.

3.2 证明：区块链中的状态是有限的

根据中本聪的白皮书中提到的，攻击者追上 z 个区块的概率为：$\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}\begin{cases}(q/p)^{(z-k)} & k \le z\\ 1 & k > z\end{cases}$.使用该公式，攻击者在拥有 30%的攻击力度，且攻击区块比诚实区块落后 5 个区块时，攻击者能够将攻击区块所在的链变成最长链的概率小于 18%.实际上 10%的攻击算力写的时间为 100GHs.因此如果一个区块后面连接 6 个区块，则该区块是足够稳定的.以上证明，区块的深度是有限的.

根据诚实矿工的策略，当一个根节点只有一个叶子节点，则连接到根节点的概率为 2/3.下一个区块仍然连接到根节点的概率降低到 2/5. 以此类推，一个节点有 5 个分支的概率小于 0.017.因此区块中的所有节点的分支将小于等于 5，即分支的数目也是有限的.总的来说，模拟过程中的状态小于等于 $\frac{a_n q - a_1}{q-1} = \frac{5^7 - 5}{5-1} = 19530$.出现其它情况的概率极小，可以不予考虑.

3.3 攻击者和诚实矿工的挖矿算法

挖矿是区块链中十分重要的过程，每个人都可以参与和维护它的运行.根据协议，诚实矿工倾向于接受最新的交易信息，并将最长链上的交易作为可信的记录.如果在同一时间段中出现两个区块，则区块链在短时间内会出现不一致的现象.新产生的区块可以任意选择想要连接的区块，与攻击者行为类似，因此无法区分攻击者和诚实者.算法 2 将诚实矿工的行为进行简化和模拟，实际上诚实矿工的行为更加复杂，该算法描述绝大多数情况下，诚实矿工的行为.即链的深度越深，该链被选择的概率越大，随着深度的减少，被选择的概率不断降低.

算法 2:选择诚实区块连接的节点
输入：区块链中某个状态的树状结构的根节点 r
输出：一个诚实区块将会连接的节点
1. 计算树的深度
2. *for* 树的层数 $i=0$ 到 n
3. *for* 第 i 层的每个节点 $j=0$ to m
4. 将每个节点权重加合
5. 根据计算得到的概率 p，选择一个连接的节点 S
6. 返回节点 S

对于攻击者，他们清楚整个系统中每个区块的状态，因此他们会尽可能的将新产生的区块连接到自己交易所在的链上.如果有多个攻击区块在不同链上，则选择攻击区块后面节点最多的叶子节点进行连接.如果没有攻击区块，则选择最长链的叶子节点进行连接.攻击者可以使用很多的攻击方法甚至是物理攻击来修改交易信息.我们很难去将所有的攻击进行模拟，但是众多攻击的目标相同，因此仅仅需要用一个简单的模型来模拟和分析这个过程.在 3.1 中证明了区块链的状态是有限的，则分析每个状态安全或者被攻击成功的概率是可行的.

4 实验和结果分析

本节使用不同的方法来展示实验的结果，分析模拟循环次数，状态数目，攻击数目之间的关系.同时，用一些真实的例子来展示方法的可行性.

4. 1 区块链的状态数目与攻击力度的关系

实验在一台配置有 40G 内存，1.8GHzcpu 的 linux 服务器上完成.将攻击力度设置从 10%到 60%改变，来统计状态数目.

在 3.1 节中，证明了区块链的状态数目小于 19530，超过的概率极小.因此本实验设置的循环次数为 25000.循环次数越多，获得的状态数目会越多.如果想获得全部的状态，需要运行很长的时间且可行度低.本实验只需要获得区块链绝大多数状态就足够.

图 2 是循环次数为 25000 时，不同攻击力度下，区块链状态的数目.图 2 的最大值为 19325，跟我们在 3.1 节中证明状态数目小于 25000 吻合.从图中可以发现不同攻击力度下状态数目都接近 19300. 结果表明系统状态数目与攻击力度无关，在该模拟过程中状态数目值在 19300 附近，因此后面的实验将 19300 作为状态总数

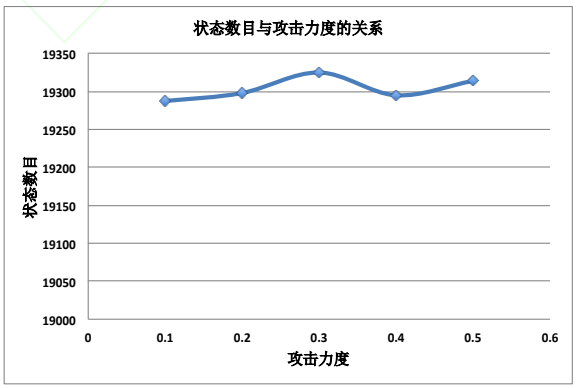


图 2 不同攻击力度下状态数目的变化图

通过进一步的实验，我们研究分析了循环次数，攻击数目和状态数目三者之间的关系.实验过程将循环次数设置从 1000 到 27000，然后统计状态数目，攻击数目和循环次数，并用折线图来展示实验的结果.攻击状态是指当一个包含虚假交易信息的区块后面连接了 6 个及以上的区块后，则该区块为攻击区块，该区块链处于攻击成功状态.图 3 展示了状态数目，攻击数目和循环次数之间的关系.从图中可以发现随着循环次数的增

加，状态数目和攻击数目也逐渐增加，状态数目增加的速率比攻击数目增加的速率快.图 4 展示了不同循环次数下，状态数目和攻击数目的增长率之间的关系.从图 4 中发现，当循环次数较小时，两者的增加率较高，随着循环次数的不断增大，增长率不断下降.当循环次数达到 17000 以上后，增长率基本不改变，维持在 0.05.从图中可以推测出当循环次数继续增大，增加率会缓慢下降，直到 0，攻击数目和状态数目都会收敛于一个稳定值.

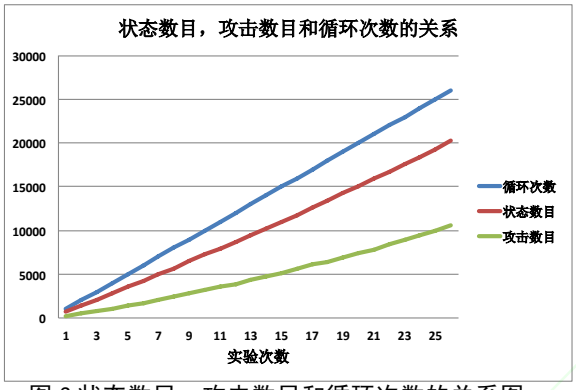


图 3 状态数目，攻击数目和循环次数的关系图

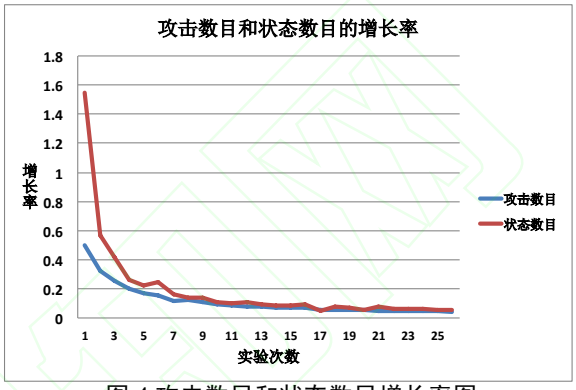
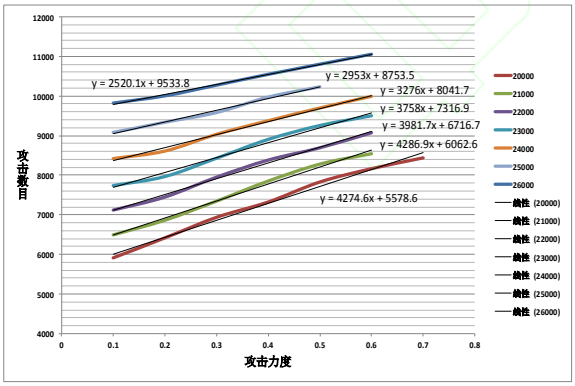


图 4 攻击数目和状态数目增长率图

4. 2 区块链的攻击数目与攻击力度的关系

本文的主要目的是分析攻击的特征，评估每个状态区块链的安全性.因此我们设置实验条件为循环次数从 20000 到 26000，攻击力度从 0.1 到 0.6 来分析攻击数目和攻击力度之间的关系.

图 5 中横坐标表示攻击的力度，纵坐标为攻击的数目.随着攻击力度的增加，攻击数目也逐渐增加.即攻击者掌控的计算资源越多，发生攻击的数目就会越大.不同的颜色表示不同的循环次数，我们使用最小二乘法计算攻击数目变化趋势.从图中可以发现，随着循环次数的增加，攻击数目的增加速率降低.即循环次数越大，攻击数目变化越小.



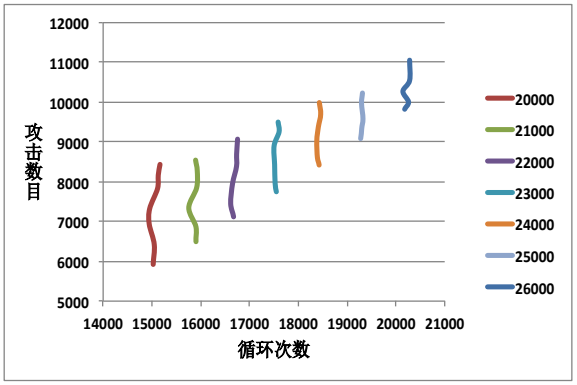


图 5 攻击数目和循环次数的关系图图 6 攻击数目最大值与最小值之间的间距关系

从图 6 中也可以发现当攻击力度固定时，攻击数目的最大和最小值之间的差值随着循环次数的增加变得越来越小.总的来说，图 5，6 的结果表明攻击数目与攻击力度，循环次数正相关，且变化速率不断减小，并将收敛于某个值.4.1 节中证明了区块链总的状态数目是恒定的，本节用实验证明了攻击数目也是收敛的，这些特征说明通过分析每个状态到攻击状态的概率是可行的，因为它们的数量是有限的.同时我们发现状态数目和攻击力度之间的关系不是简单的线性关系.

图 7 是循环次数为 24000，攻击力度从 0.1 到 0.6 时，攻击力度和状态数目的关系.横坐标为攻击数目，纵坐标是状态数目.发现两者的关系与正弦函数类似，即两者呈现周期性的变化.再次改变循环次数为 20000 到 25000，攻击数目和状态数目之间的关系仍然呈现周期性变化.

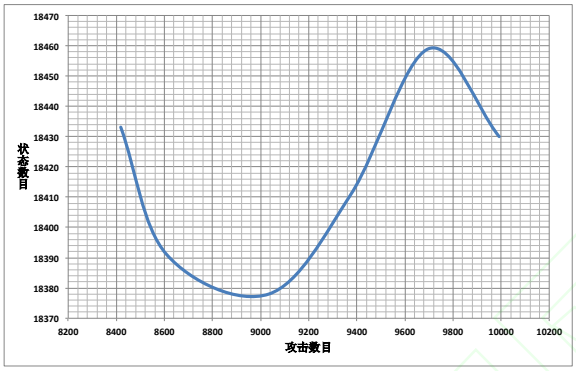


图 7 相同循环次数不同攻击力度下，状态数目和攻击数目的关系图

4. 3 每个状态被攻击的概率计算

通过将实验中的循环次数设置呈 25000，攻击力度设置为 0.4 来分析区块链的深度和状态数目之间的关系.表格统计了区块链不同层次中状态的数目和攻击成功的数目.实验结果表明总的攻击数目为 832，深度为 6 的状态数目为 17356.两者的比例 8732/17356 近似与 0.5，符合我们的预期.因为诚实攻击者的选择策略中概率和区块链的深度之间呈现一种等比关系，且最后一层的状态数目占总的状态数目的一半，攻击数目的变化规律跟状态数目的变化类似.

深度	状态数目	攻击数目
1	1	1
2	15	6
3	113	19
4	871	56
5	6644	1120
6	17356	8732

根据模拟算法，我们获得了区块链中各个层次中的状态和攻击结构，从而可以分析不同层次的状态到达各个攻击状态的概率，评估系统的安全性.

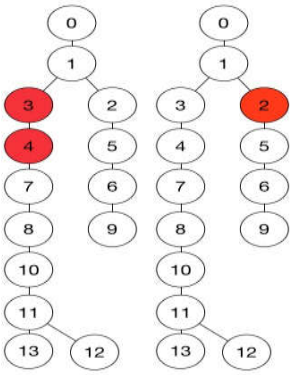


图 8 攻击状态结构图 a

图 9 攻击状态结构图 b

我们把找到的攻击状态作为分析的目标，分析不同结构到达攻击状态结构的概率.这些概率的总和代表该状态下被攻击成功的可能性大小.当该值大于设定的参数值时，可以向区块链中的用户发送警告，采取一定措施来降低攻击概率，例如延长确认交易的时间等.图 8，图 9 是实验过程中发现的攻击状态的结构特征.图 8 中节点

3 包含了虚假交易，诚实矿工不知道区块的状态，仍然可能将新产生的区块连接上去.攻击者则会尽快的将更多的节点连接到节点 3 所在的链上，攻击者也可以采取日蚀攻击将找到的区块存放一段时间后，一次性释放，使区块的交易信息尽快处于稳定状态.攻击类型很多，从攻击层面分析系统的安全性，将会比较复杂，而区块链中的结构是相同且有限的，通过分析每个状态的结构特征，计算被攻击的概率，可以评估系统的安全性.例如我们有图 9 结构的特征，当该结构的高度为 3 时，我们使用去随机化的方法计算该结构到高度为 4 的攻击结构的概率，根据表格可以发现深度为 4 时状态有 871 个，深度为 3 的其它状态有 112 个.可以计算该状态到这 983 个状态的概率，可以减少计算状态数目，因为很多状态无法从当前的状态添加一个节点后获得.以此类推，直到计算出到达攻击状态的概率，从而获得攻击的可能性大小，评估系统的安全性.

在真实情况下，如果顾客 A 创建一个交易将一定数量的比特币发送给 B，从商家 B 获得服务.同时顾客 A 又创建一个交易使用相同的比特币从商家 C 获得其它的商品.当工具检测到有比特币被花费多次时，可以检测当前状态下结构，对每种情况进行分类讨论，即第一笔交易是虚假的和第二笔交易为虚假的两种情况进行分析，计算出两种情况下被攻击的概率.选择概率较低的情况，将另一个情况中的交易进行标记，系统不在承认该交易，同时向用户发送提醒，采取措施来降低攻击概率.

5 相关工作

目前对区块链安全性的研究大多数是通过定义一些数学模型,然后改变其中的参数来分析结果.Emmanuelle 等[12]形式化定义了区块链的正确性(validity property),双重支付状态(double-spending situation),正确交易(conflict-free transation)和验证过程(local confirmation),构造了区块链模型.通过数学推导证明了区块链的四种性质与矿工有关,分析了与区块链安全相关的因素和提高安全性的方法.但是这些都是理论上的证明和分析,实际运行过程中,环境更为复杂,因此需要结合区块链的实际运行状态,来分析安全性.

本文与 Emmanuelle 研究的区别主要在于 Emmanuelle 将整个区块链的运行过程当成一个统一的整体，而本文将区块链分成一个个循环，分析从初始状态到攻击状态的过程，来分析系统的安全性，并用应用程序来分析区块链的安全性.

Rafael[16]等人用（h_{-1},n,m）表示链状结构，h_{-1} 是指向区块链中前一区块的指针，m 是区块链标识，n 代表工作量证明，并用 p 表示挖坑的难度，构造出一个简化的区块链协议模型.同时规定诚实矿工在传递消息时，必须延长 L 段时间，来模拟网络延迟的情形，从而分析区块链协议在异步网络情形中的安全性.在本文中，攻击者和诚实矿工都及时进行消息传递，且诚实矿工和攻击者的数目是确定的.通过获得区块链的状态来分析区块链的安全，在进一步研究中，可以考虑网络延迟的情况.

Arthur[7]等人结合区块链中的具体实例如比特币，莱特币（Litecoin），Dogecoin 和 Ethereum，根据不同实例的特征，构建了不同的模型，并通过改变模型中的参数来分析底层协议区块链的性能.Arthur 用 r_s 阻塞率表示区块大小，区块时间间隔网络延迟，信息传递机制等影响，用 a 表示攻击者掌握的算力，Cm 表示挖坑的代价，例如硬件，电力和人力等.K 表示一个交给被 k 个用户接受.用 $M=<S,A,P,R>$表示单个用户的决策问题，S 是状态空间，A 是动作空间，P 表示转移矩阵，R 是奖励矩阵，M 表示马尔科夫决策过程.通过模型参数的改变，分析出将区块大小改成 1MB，间隔时间缩短到 1 分钟，不会严重影响系统的安全性，且系统吞吐量会高于每秒 60 个事务 tps.Arthur 等人分析区块大小和时间间隔对区块链安全性的影响，而本文不针对具体的实例进行分析，更关注于区块链本身协议的特征.

与已有的研究方法进行比较，本文将区块链过程划分成循环的过程，构建了模型来模拟区块链的运行过程，找到区块链的状态，通过研究状态的转变来评估系统的安全性.

6 总结以及未来的工作

本文提出了一个新颖的树状结构的方法来模拟区块链的运行过程，并分析攻击数目和状态数目的关系，以此来计算区块链中每个状态的安全性.该方法具有通用性，任何的攻击影响都可以使用该方法来评估.本文

使用了 51%的算力攻击作为唯一的攻击方式，通过简化区块链中复杂的过程包括工作量证明，时间戳等用树状结构来代替区块链的状态，研究不同攻击力度，循环条件下，攻击数目，状态数目之间的关系，并用实验进行验证.

该方法也存在一些局限性.我们采用了唯一的一种攻击方式 51%攻击来进行模拟，虽然我们认为攻击策略和状态等无关，但没有实验证明攻击类型和状态数目，攻击数目之间的联系.同时真实区块链中诚实矿工选择策略会更加复杂，没有恒定的规律，本文仅用递减的模型来模拟诚实矿工的行为.后续可以继续进行改进和研究.

区块链被认为是 21 世纪极具前景的技术，已经被应用在去中心化金融交易平台，智能合约，物理跟踪等领域.比特币平台不断有各种攻击产生，这也是比特币还未在全球使用的原因之一.区块链的安全性急需一种方法来进行分析和检测，降低被攻击的可能性.未来可以实时的监控区块链系统的结构，并将该检测工具应用于实际的安全性检测中.

References:

[1] Grinberg R. Bitcoin: an innovative alternative digital currency. Social Science Electronic Publishing, 2011.

[2] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system. Consulted, 2008.

[3] Nayak K, Kumar S, Miller A, Shi E. Stubborn mining: generalizing selfish mining and combining with an eclipse attack. 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS P). 2016: 305–320.

[4] Eyal I, Gencer AE, Sirer EG, Van Renesse R. Bitcoin-ng: a scalable blockchain protocol. 2015: 45–59.

[5] Bissias G, Levine BN, Ozisik AP, Andresen G. An analysis of attacks on blockchain consensus. 2016.

[6] Natoli C, Gramoli V. The balance attack against proof-of-work blockchains: the r3 testbed as an example. 2016.

[7] Heilman E, Kendler A, Zohar A, Goldberg S. Eclipse attacks on bitcoin's peer-to-peer network. Usenix Conference on Security Symposium. 2015: 129–144.

[8] Garay J, Kiayias A, Leonardos N. The bitcoin backbone protocol: analysis and applications. 2015, 9057: 281–310.

[9] Lewenberg Y, Sompolinsky Y, Zohar A. Inclusive block chain protocols. FC. 2015: 528–547.

[10] Decker C, Wattenhofer R. Information propagation in the bitcoin network. IEEE Thirteenth International Conference on Peer-To-Peer Computing. 2013: 1–10.

[11] Gervais A, Karame GO, Glykantzis V, Ritzdorf H, Capkun S. On the security and performance of proof of work blockchains. ACM Sigsac Conference on Computer and Communications Security. 2016: 3–16.

[12] Yermack D. Corporate governance and blockchains. 21802, National Bureau of Economic Research, 2015.

[13] Kaskaloglu K. Near zero bitcoin transaction fees cannot last forever. The Society of Digital Information and Wireless Communication, 2014: 91–99.

[14] Liehuang Z, Feng G, Meng S, Yandong L, Baokun Z, Hongliang M, Zhen W. Survey on privacy preserving techniques for blockchain technology. Journal of Computer Research and Development , 54(10): 2170–2186.

[15] Kumar A, Fischer C, Tople S, Saxena P. A traceability analysis of monero's blockchain. 2017.

[16] Vasek M, Thornton M, Moore T. Empirical analysis of denial-of-service attacks in the bitcoin ecosystem. Financial Cryptography and Data Security. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014: 57–71.