以太坊源码解析：trie上篇

2019-01-12 fatcat22 ethereum 原创 ethereum trie 源码解析

> 本篇文章分析的源码地址为：https://github.com/ethereum/go-ethereum
> 分支：master
> commit id: 257bfff316e4efb8952fbeb67c91f86af579cb0a

引言

trie（Merkle Patricia Tree，又称MPT）是以太坊（ethereum）中用来加密存储任意(key,value)数据对的树形结构。它的插入、查找和删除效率都是O(log(N))，但它比其它树形结构如红黑树等更简单、更容易理解，并且还具有默克尔树的特性。我们期望从原理和源代码两方面入手，以期对其进行深入的了解。

我们分两篇来介绍trie。本篇是上篇，主要介绍相关原理。下篇会从源代码的角度入手对实现进行分析。

trie官方原理介绍在这里，下面原理部分的分析有不少是参考了官方的讲解文档。

trie原理

以太坊的Trie模块在普通Trie的基础上，进行了改进和优化。下面我们会首先介绍普通的Trie，然后看看以太坊对普通的Trie进行了哪些改进，以及在以太坊中的应用和特性。

预备知识：普通的Trie

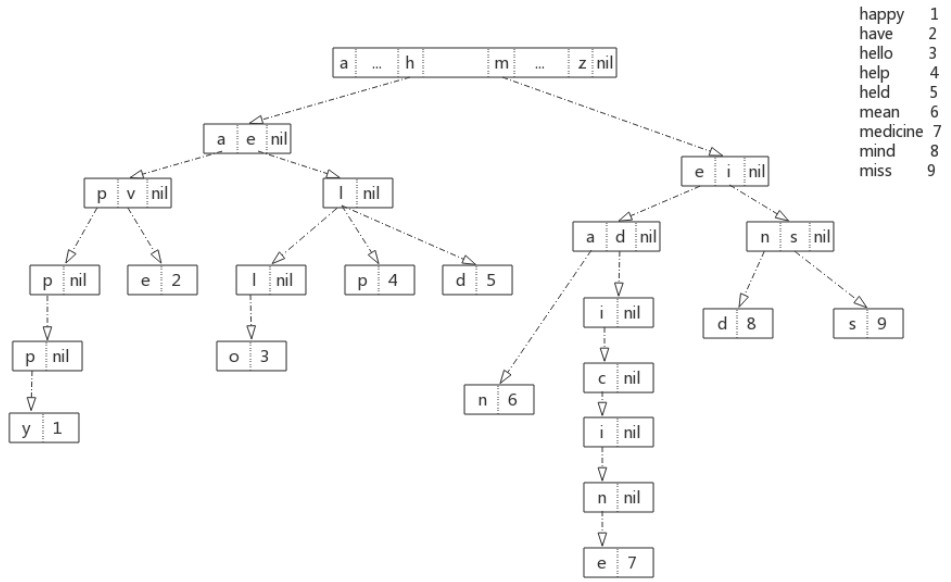
关于什么是Trie，我觉得维基百科里的描述已经非常清楚了，大家可以先看看百科上的描述。这里我直接摘录部分我觉得重要的内容：

> trie，又称前缀树或字典树，是一种有序树，用于保存关联数组，其中的键通常是字符串。与二叉查找树不同，键不是直接保存在节点中，而是由节点在树中的位置决定。一个节点的所有子孙都有相同的前缀，也就是这个节点对应的字符串，而根节点对应空字符串。

特别注意 `字典树` 这个词，可以说是特别形象了。为什么呢？看完一个例子你就能理解了。

Content

- 引言
- trie原理
  - 预备知识：普通的Trie
  - 以太坊trie的改动和优
    - 使用[]byte作为key
      型，而非字符串
    - nibble: key类型的
      位
    - 使用hash引用结点
      内存指针
    - 当树的某条路径没
      时，使用一个结点
      径上的所有key
    - 内部节点引用计数
  - 特性
- 总结
- Similar Posts
- Comments



（图中每个结点都有一个类似于根结点那样的数组，但简单起见其它结点都把在这里无用的数组元素忽略了。）

在上图中，每个结点其实都只是key的一部分，或者说就是key的一个字符。在按照某一个key向下遍历直到key最后一个字符时，也就找到了这个key对应的value。你有没有发现这种查找value的方式，跟查字典一模一样？所以说，`字典树`这个名字真的是非常形象。

虽然这里没有给出像样的定义，但看完维基百科和上面的例子，相信你已经可以理解什么是Trie了。一般来说，Trie的结点看上去是这样子的：

> [[Ia, Ib, … I*], value]

其中`[Ia, Ib, ... I*]`在本文中我们将其称为结点的 *索引数组* ，它以key中的下一个字符为索引，每个元素`I*`指向对应的子结点。`value`则代表从根节点到当前结点的路径组成的key所对应的值。如果不存在这样一个key，则value的值为空。

以太坊trie的改动和优化

以上面描述的Trie为基础，以太坊主要从以下几个方面对其进行了改进和优化。

使用[]byte作为key的类型，而非字符串

在以太坊的Trie模块中，key和value都是[]byte类型。如果要使用其它类型，需要将其转换成[]byte类型（比如使用rlp进行转换）。当然这不是什么本质上改变，我个人感觉只是为了编码方便吧。因为rlp模块可以方便的把各种结构序列化成[]byte而不是string。

nibble: key类型的最小单位

你可能会疑惑，刚才不是说使用key的类型是[]byte吗？那最小单位自然是byte，nibble又是什么？

其实在以太坊的Trie模块对外提供的接口中，key类型当然是[]byte。但在内部实现里，将key中的每个字节按高4位和低4位拆分成了两个字节。比如你传入的key是：

> [0x1a, 0x2b, 0x3c, 0x4d]

Trie内部将这个key拆分成：

> [0x1, 0xa, 0x2, 0xb, 0x3, 0xc, 0x4, 0xd]

Trie内部的编码中将拆分后的每一个字节称为 **nibble**

但为什么要这样做呢？

如果使用一个完整的byte作为key的最小单位，那么前文提到的索引数组的大小应该是256（byte作为数组的索引，最大值为255，最小值为0）。而索引数组的每个元素都是一个32字节的哈希（这在下一条中进行了说明）,这样每个结点要占用大量的空间。并且索引数组中的元素多数情况下是空的，不指向任何结点。因此这种实现方法占用大量空间而不使用。以太坊的改进方法，可以将索引数组的大小降为16（4个bit的最大值为0xF，最小值为0），因此大大减少空间的浪费。

使用hash引用结点而不是内存指针

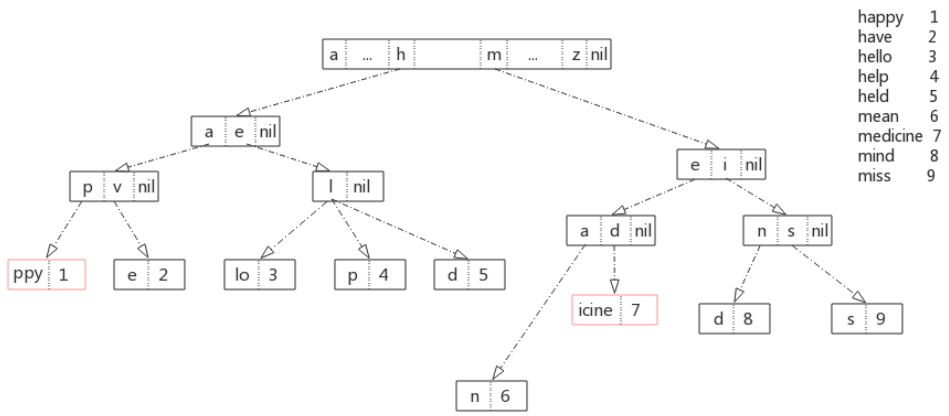
在以太坊的实现中，索引数组的每个元素都是下一个结点的hash，而非指针。也就是说，父结点持有的是子结点的hash。

这种实现方式使得以太坊中的Trie带有了默克尔树的功能：如果两个Trie的根结点的hash相同，我们就可以断定，这两棵树的内容完全一样。Trie用来存储以太坊账户的状态（state）等，就是利用利用这个特性对区块进行校验的。

需要注意的是，这种实现也包括对value的引用。也就是说在以太坊的Trie中，遍历到叶子结点以后得到的是value的hash，而非value本身。使用这个hash从数据库中读取出来的值才是value。

当树的某条路径没有分支时，使用一个结点存储路径上的所有key

我们回看上面介绍字典树的那张图，其中”medicine”这条路径中，除了前三个字符’med’，其它字符都没有分支，因此为了节省空间，以太坊将这种情况下的结点缩减为一个。如下图所示：



这样就可以进一步节省空间的开销。但同时也产生了一个问题：对于某个结点，如何知道它存储的是索引数组，还是key的数组呢？

以太坊解决这个问题的方式是通过结点元素个数的不同进行区分。以太坊在Trie内部将结点分成了两类：全节点（fullNode）和快捷节点（shortNode）。全节点有17个元素，而快捷结点有两个元素。它们的示意表达如下：

> 全结点： [i0, i2, … i15, value]
> 快捷结点： [[k0, k1, … kn], value]

可以看到全结点由索引数组（共16个元素）和一个value组成（前面说过value的引用也是通过hash，而不是直接存储value的值）；而快捷结点有2个元素，一个是key数组，另一个就是value。

此时虽然可以知道一个结点存储的数据的格式，但对于快捷结点，仍有两个问题没有解决。 一个问题是，前面说过key的最小单位是nibble，。那么如果在快捷结点中nibble的个数是奇数，它重新组合成[]byte存储就会有麻烦。比如

> nibbles: 0x1 0xa 0x2 0xb 0x3
> 组合成[]byte？ 0x1a 0x2b 0x30 还是 0x01 0xa2 0xb3

可见无论怎么组合，都会有多写入一个无效的nibble。等再解析的时候，我们怎么知道哪个是无效的呢？

另一个问题是，我们该如何解析快捷结点中的value所代表的数据。它是代表真正的value数据，还是另一个结点？

这两个问题存在的原因在于，Trie中的结点是需要进行数据库存取的。如果只是在内存中，这两个问题不会存在：只在内存中没有必要把nibble组成的key变成[]byte类型；通过数据的结构体类型也很容易知道value所代表的数据类型。但要将快捷结点存入数据库中，需要将nibble组成的key变成[]byte存储（其实也可以直接存储nibble数组，只是多占了一倍空间）；而从数据库中读取value所代表的数据时，需要知道是将其解析成一个新的结点，还是仅代表value原始值无需解析。

有问题就要解决。既然问题产生于数据库的存取，很自然地我们会想到，可以在存的时候加上一些信息，能标识出哪一位是无效的nibble，和value所代表的数据类型。当从数据库中取的时候，就可以根据这些信息将数据恢复啦。

是的，解决的思路都是类似的，只是实现方法千千万。以太坊的实现方法是在存入数据库时，将nibble组合成的[]byte值的第0个字节的高4位作为信息存储位而不存储真正的nibble字节。可以说这种方法真是一点内存都不浪费。

那么第0个字节的高4位是怎么组织的呢？目前我们有两个信息需要存储：

- nibble的个数的奇偶信息
- value代表结点还是真正的value数据

可以看到这俩个信息都是二元的（非此即彼），因此有2个bit就可以了。以太坊的做法是第0位存储奇偶信息，第1位存储value代表的类型。具体信息如下：

hex char	bits	value代表类型	nibble个数奇偶	低4位是否有效
0	0000	结点	偶数	无效
1	0001	结点	奇数	有效，第一个nibble
2	0010	数据	偶数	无效
3	0011	数据	奇数	有效，第一个nibble

可以看到当nibble个数为偶数时，第0个字节的低4位总是无效的；但为奇数时，低4位是有效的，其值为第一个nibble。

让我们通过例子来确认对这些描述的理解。以下示意的都是快捷结点：

```
[ [0xa, 0xb, 0xc, 0xd, 0xe], value_node ]  // 奇数个nibble, value代表node
编码： 0x1a 0xbc 0xde

[ [0xa, 0xb, 0xc, 0xd], value_node ] //偶数个nibble, value代表node
编码： 0x00 0xab 0xcd

[ [0xa, 0xb, 0xc, 0xd, 0xe], value_data ] //奇数个nibble, value代表数据
编码： 0x3a 0xbc 0xde

[ [0xa, 0xb, 0xc, 0xd], value_data ]  //偶数个nibble, value代表数据
编码： 0x20 0xab 0xcd
```

需要再强调一下的是，这个编码方法只有在数据库存取的时候才用到。在读到内存中以后，nibble是直接以[]byte类型存储的（虽然每个byte的最大值是15）,且如果value代表的是数据则在nibble数组的最后append值16（注意16是一个无效的nibble值，因此可以和正常的nibble值作区分），代码中根据最后一个值是否是16判断value的类型。

另外虽然我们一直没有明确说明，但上面在说value代表的类型的时候，我们其实是在判断当前结点是不是叶子结点：如果是叶子结点，value当然代表数据；如果不是，value也当然代表一个node。

至此，所有问题都已解决，终于可以正常的将多个没有分支的结点压缩到一个结点存储了（为了解决一个问题，引入了好几个问题）。

我们来总结一下我们当前讨论的改进：以太坊通过以下方式，减少无分支路径上的结点数：

- 将结点类型分成了fullNode和shortNode，shortNode存储多个key的nibble

- 使用第0个字节的高4位编码，标识nibble的奇偶个数（也即第0个字节的低4位是否是有效的nibble）和value类型（也即当前结点是否是叶子结点）

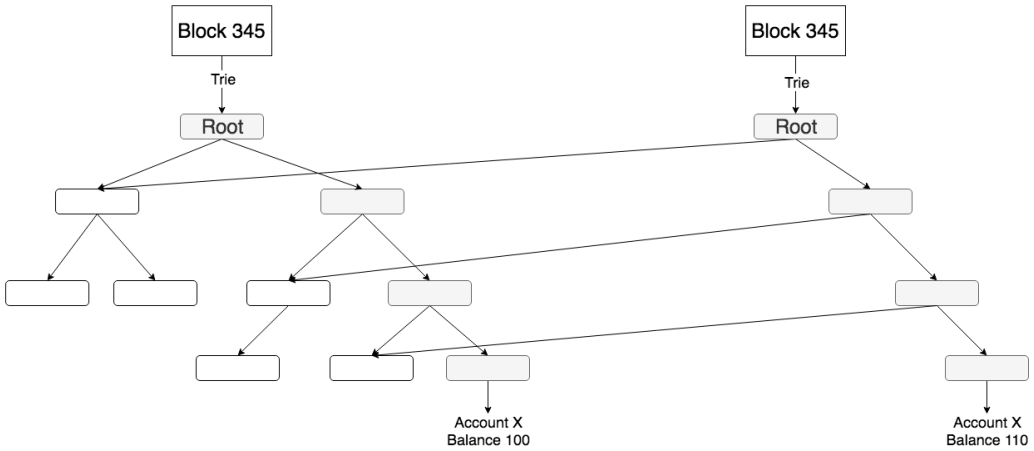
内部节点引用计数

这一改进其实与trie原理本身没有关系，但我认为也是非常重要的，因此有必要在这里介绍一下。

在trie模块中，有一个 `Database` 对象，你可以理解为它是底层数据库的一个缓存层。在实际使用过程中，`Trie` 对象就把 `Database` 作为数据库使用。但 `Database` 的重要功能不在于缓存，而在于缓存时对节点数据进行了引用计数，并提供了 `Database.Reference` 和 `Database.Dereference` 来引用和解引用某个trie节点。如果某个节点的引用计数变为0，则该节点将被从内存中删除，因而也不会被写入到真正的数据库中。

注意 `Database` 中只对内存中缓存的节点进行了引用计数，已经写入数据库的节点没有引用计数数据。

以太坊的trie模块为什么对trie作了这么一个改进呢？这主要是为了解决以太坊数据存储的问题。随着以太坊的长时间运行，以太坊数据已经非常大且仍在以类似指数的速度增长。增长的主要数据，就是以太坊的账户状态（state）信息，而以太坊trie作为state的底层数据组织方式，它的实现决定了这种增长速度。因为在以太坊中，每生成一个新的区块，不会直接修改上一个区块的state数据，而是类似于“写时复制”的机制，将数据修改后重新存储一份，对于trie来说则是生成新的子节点进行存储，如下图所示：



以上图为例，只要修改账户X的信息，就需要新增4个节点而不会修改原来的节点（实际情况可能不止4个），这就是state数据增长如此之快的原因。为了减轻数据存储的压力，以太坊提出了修剪区块（pruned block）的概念，即利用trie模块中的 `trie.Database` 对缓存节点进行引用计数，并在blockchain模块中进行相应的引用和解引用操作。如此释放了大量不需要保存的历史数据的存储空间。（关于区块修剪可以参考这里）

特性

从上面介绍的所有改进我们可以了解到，以太坊的实现非常节省内存。另一个重要的改进是，它与默克尔树进行了融合，在可以高效存取(key,value)对的同时，还具有默克尔树的特性：通过比较两个Trie对象的根结点的hash，就可以判断这两棵树是否存储了相同的内容。

默克尔树的这一特性是非常有用的。在以太坊中，Trie用来存储四种对象：

- State
- Storage
- Transactions
- Receipts

现在我们可以不必理会这些对象的意义（其实我现在也不是全部了解），但它们在Trie这一层面都是类似的，我们以State举例。以太坊的State存储了区块上所有账号的信息，包括账户余额等。这些账号信息随着区块的变化而变化。在即将打包一个新的区块时，以太坊会更新代表State的Trie对象，并将更新后的Trie根结点hash写入新的区块头中。当其它运行以太坊节点的机器收到这个区块时，它可以根据上一个区块中的State信息，加上新块区的变动后，将得到的Trie的根结点hash与区块头中的进行比较。如果hash一致，则这个区块的State信息就得到了承认。

总结

这篇文章里，我们主要介绍了以太坊中Trie的实现原理。以太坊对传统Trie进行了优化，使其可以更加的节省内存。更重要的是，它与默克尔树进与了融合，使其在应用时更加方便有效。当然这些改进和融合也引入了复杂度，正如前面说的，为了解决一个问题，引进了两个新的问题。这也是以太坊Trie的实现相对较复杂的主要原因。

下一篇中，我们将通过源代码的角度，对Trie进行进一步的分析。

Similar Posts

- 初识联盟链1: Fabric 是什么
- PBFT代码篇：fabric 中的 PBFT 实现
- 实用拜占庭容错算法（PBFT）
- 拜占庭将军问题
- 数据结构与算法：B树
- 以太坊源码解析：evm

上一篇 golang:反射的规则

下一篇 以太坊源码解析：trie下篇

Comments

Comments

Login

There are no comments posted yet. Be the first one!

Post a new comment

Enter text right here!

Comment as a Guest, or login:

Name

Displayed next to your comments.

Email

Not displayed publicly.

Website (optional)

If you have a website, link to it here.

Subscribe to None

Submit Comment

Contact me at:

Site powered by Jekyll & Github Pages. Theme designed by HyG.