源码分析报告二——MVStore流程设计分析

1. 前言

笔者认为，对于一个数据库，最基本的操作就是对数据的增删改查。因此本报告将主要讲述MVStore的增删改查机制和数据结构。同时，因为H2以内存存储为特色，所以笔者还会讲述MVStore的内存存储部分过程。

2. 内存数据库表层操作

MVStore中有一个MVStore类，实际上我们就可以把它当作一个内存数据库。让我们来看下面的这个例子：

```
    public static void main(String[] args) throws Exception {
        // open the store (in-memory if fileName is null)
        MVStore s = MVStore.open(null);
        MVMap<Integer, String> map_1 = s.openMap("firstMap");
        MVMap<String, Integer> map_2 = s.openMap("secondMap");
        map_1.put(1, "spring");
        map_1.put(3, "fall");
        map_1.put(3, "autumn");
        map_2.put("English", 59);
        map_2.remove("English");
        System.out.println(map_1.get(1));
        System.out.println(map_1.get(4));
        System.out.println(map_2.get("Math"));
        System.out.println(map_2.get("English"));
        s.commit();
        s.close();
```

我们实例化了一个名叫s的属于MVStore类的对象。我们来看open方法的定义：

```
    public static MVStore open(String fileName) {
        HashMap<String, Object> config = new HashMap<>();
        config.put("fileName", fileName);
        return new MVStore(config);
    }
```

open方法创建了一个名叫config的哈希表。在表中放入了一个键值对。这个哈希表将传入到MVStore的构造方法中去。那么我们来看这个构造方法：

```
    MVStore(Map<String, Object> config) {
        compressionLevel = DataUtils.getConfigParam(config, "compress", 0);
        String fileName = (String) config.get("fileName");
         FileStore<?> fileStore = (FileStore<?>) config.get("fileStore");
        boolean fileStoreShallBeOpen = false;
```

```
            if (fileStore == null) {
                if (fileName != null) {
                    ...
                }
                fileStoreShallBeClosed = true;
            } else {
                ...
            }
            this.fileStore = fileStore;
            keysPerPage = DataUtils.getConfigParam(config, "keysPerPage", 48);
            backgroundExceptionHandler =

    (UncaughtExceptionHandler)config.get("backgroundExceptionHandler");
            if (fileStore != null) {
                ...
            } else {
                autoCommitMemory = 0;
                meta = openMetaMap();
            }
            onVersionChange(currentVersion);
        }
```

这段代码比较长，笔者只挑一部分来说明。实际上由于我们采用了内存模式（fileName为null），因此没有运行的代码笔者在此省略掉。在此之前，该构造方法还初始化了一部分成员变量，但就目前而言不是很重要。

我们注意到有一个名叫fileStore的对象。在此处它的值为null，后期我们将会注意它。在这里还需要注意的是一个名叫meta的成员变量（在代码块外就已被初始化为null）。它所属的类为MVMap。MVMap和HashMap类似，是MVStore存储的一个基础结构。meta可以说是MVMap的MVMap。之后我们将会展示meta的功能。

MVStore类对象成功建立之后，我们打算创建两个对象map_1和map_2。它们都调用了MVStore中的OpenMap方法。

```
    public <K, V> MVMap<K, V> openMap(String name) {
        return openMap(name, new MVMap.Builder<>());
    }
```

从这段代码我们可以看到，我们实际上是执行的另外一个同名方法。不过该方法的具体过程在此不作具体讲述，我们只需要知道它的功能是：返回和名字对应的表，如果没有则当场创建一个以该名字命名的表。在这里，数据库里并没有这两个表，于是便创建了两个空表。

接着就是增删改查操作。从例子中我们可以看到，增和改调用的是MVMap里的put方法，MVMap类中的put方法定义如下：

```
    public V put(K key, V value) {
        DataUtils.checkArgument(value != null, "The value may not be null");
```

```
        return operate(key, value, DecisionMaker.PUT);
    }
```

这段代码首先检查了value：value不能为空，然后真正起作用的是operate方法。注意到operate方法里面有一个参数DecisionMaker.PUT，我们可以猜测：operate方法应该可以完成多种对MVMap的操作，并且由DecisionMaker决定执行什么操作。

```
    /**
     * Add, replace or remove a key-value pair.
     ...
     */
    public V operate(K key, V value, DecisionMaker<? super V> decisionMaker) {
        IntValueHolder unsavedMemoryHolder = new IntValueHolder();
        int attempt = 0;
        while(true){...}
    }
```

在此给出operate方法的部分代码。由注释我们可以看到，operate可以增删改MVMap对象中的键值对。不用看remove方法的代码，我们也可以知道其一样调用了operate方法。若不放心，大可验证一下：

```
    public V remove(Object key) {
        return operate((K)key, null, DecisionMaker.REMOVE);
    }
```

而对于get方法（根据key查找value）,同样也是调用了operate方法，只是参数不同罢了。最后commit和close方法将保存更改持久化数据、关闭数据库，而此处我们使用的是内存模式，程序结束后所有的数据都会丢失，这两个方法的有无影响不大。并且这两个方法调用的方法相当多，我们仅简单介绍。

首先是commit方法，此部分代码如下所示：

```
    public long commit() {
        return commit(x -> true);
    }

    private long commit(Predicate<MVStore> check) {
        if(canStartStoreOperation()) {
            storeLock.lock();
            try {
                if (check.test(this)) {
                    return store(true);
                }
            } finally {
                unlockAndCheckPanicCondition();
            }
        }
        return INITIAL_VERSION;
    }
```

我们在这里看到了与锁相关操作。MVStore作为数据库引擎，自然要处理多用户、多线程的情况，但这不是我们要讨论的重点。除开这些，我们很容易注意到，这部分的核心是`store`方法，但我们并不打算仔细研究该方法。

`close`方法也是如此：我们可以看到，实际上起作用的是`closeStore`方法。这两个方法都相当复杂，我们不多作展开。

```
    public void close() {
        closeStore(true, 0);
    }
```

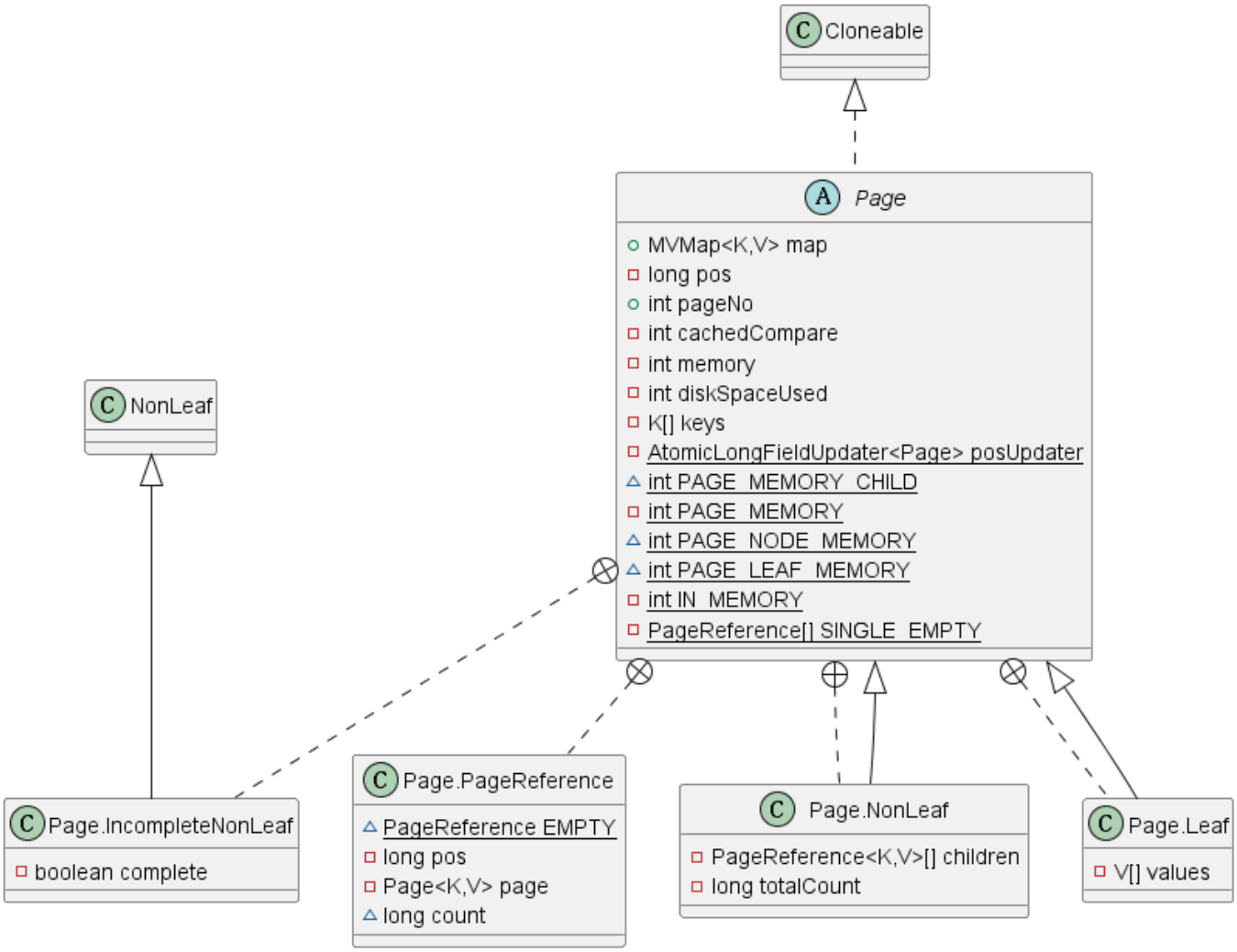
2. MVStore底层结构

2.1 MVStore的数据结构

笔者认为，数据结构的设计在整个项目中算是比较底层的内容，对于具体的数据存放地址、指针寻址等内容是比较枯燥乏味的，在此和地址有关的成员变量、方法将会略过——更重要的是如何用面向对象的方式讲述本部分内容。并且此部分更侧重讲述这些类地成员变量，较少提及相关的方法。

2.1.1 Page和MVMap

MVMap默认采用B+树结构进行存储，关于B+树的内容，读者可以查阅相关资料。我们都知道，树这种数据结构需要结点。在MVStore中,B+树的结点采用`Page`类进行保存。`Page`类是抽象类，其下有三个子类：`Nonleaf`、`Leaf`、`incompleteLeaf`。

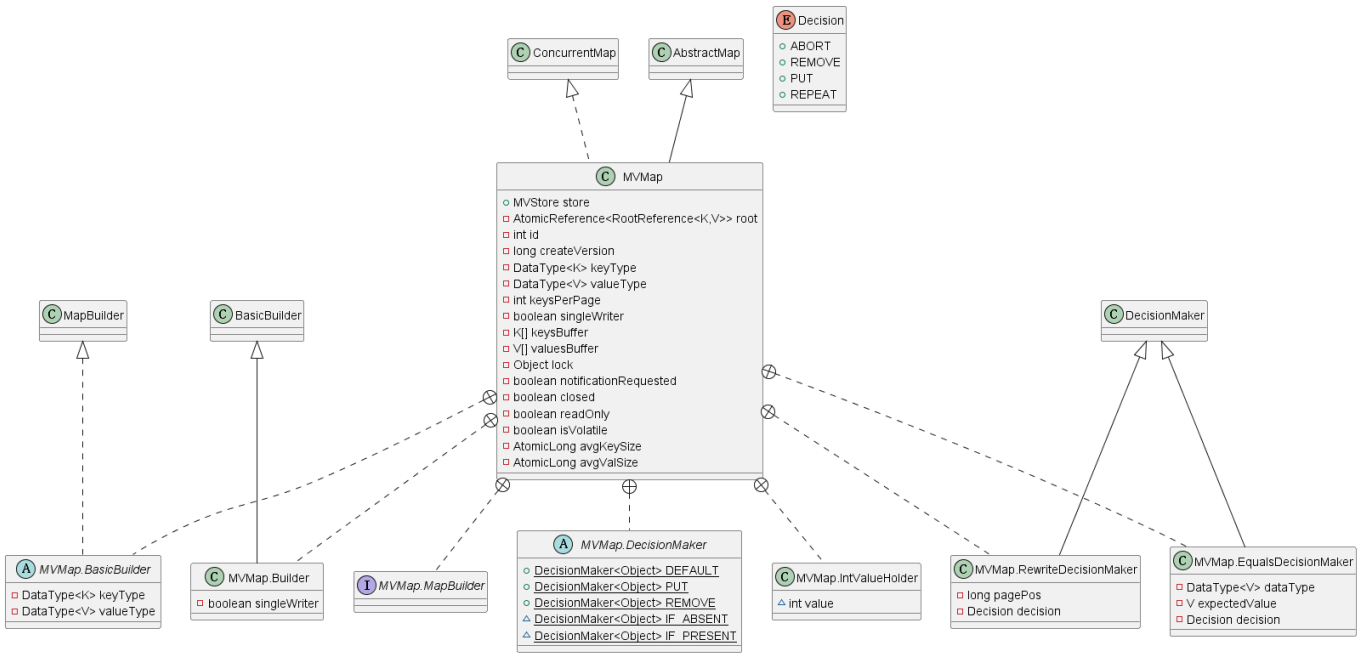


Page及其子类的成员变量（PlantUML绘制）

对于每一个Page，都有一个指向自身所在的MVMap类成员变量`map`。`keys`以数组的形式保存键。Page中还有一个名叫`PageReference`的类，其作用相当于指针（引用），指向的就是内部的成员变量`page`。同时还需要记录以所指向的`page`为根的子树所包含的数据总数`count`。

而对于B+树，我们可以将它的结点分为两种：叶子节点和内部结点（非叶子结点）。于是这就产生了两个子类：`Leaf`和`NonLeaf`。对于叶子结点而言，只需要记录`value`数组存储值；对于内部结点，也就是`NonLeaf`，它需要用一个`PageReference`类数组保存孩子结点的引用，也就是`children`。`totalCount`用来保存孩子结点数目。而`incompleteNonLeaf`是`NonLeaf`的泛化，在对Page进行复制的时候，复制的Page可能不需要孩子结点引用（或者保持原状），`incompleteNonLeaf`起到一个过渡的作用，是一个中间过程产生的类。

说完Page，那么由Page构成的MVMap就比较清楚了。MVMap的UML类图如下：



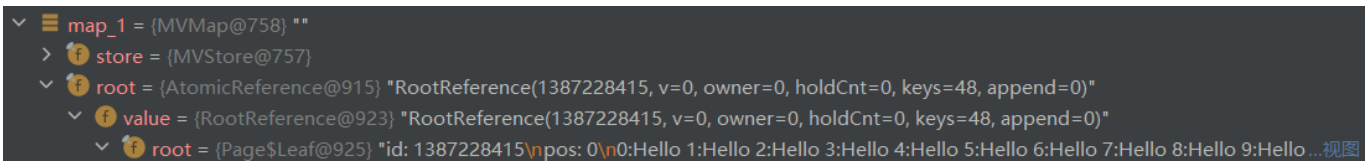
MVMap及其相关类的成员变量（PlantUML绘制）

图中有许多构造器（Builder），这些不在我们的考虑范围之内；而`DecisionMaker`系列之前也有提及，它和`operate`方法一起，集成了对MVMap的数据操作。

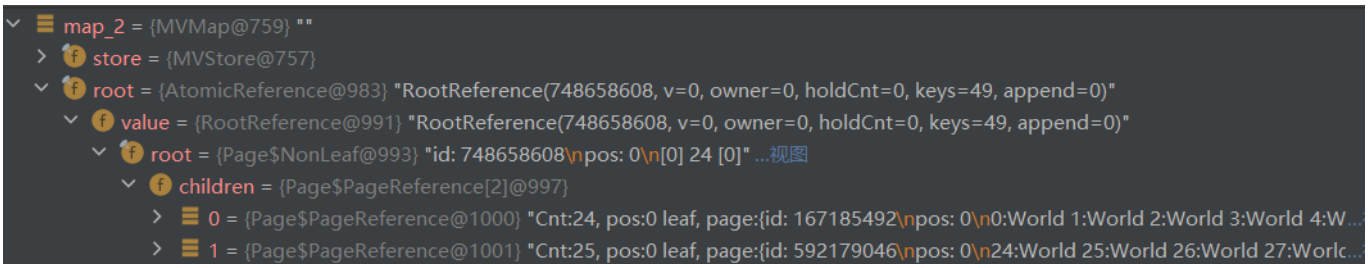
`MVMap`类继承了`AbstractMap`类，实现了`ConcurrentMap`类接口。和`Page`类似，`MVMap`的成员变量中的`store`也是一个引用；`root`指向的是B+树的根结点（Page）。在这个层级，MVMap被赋予了`id`：这也很好理解，毕竟MVStore所存储的MVMap可以不止一个。比较有趣的是`keysPerPage`这个成员变量，在源码中它被默认赋予初值`48`。这也意味着每一个Page默认最多存储48个键，也就是说，MVMap的B+树默认是49阶的。我们可以找一个例子简单地验证一下：

```
MVStore s = MVStore.open(null);
MVMap map_1 = s.openMap("48keys");
MVMap map_2 = s.openMap("49keys");
for(int i = 0; i < 48; i++)
    map_1.put(i,"Hello");
for(int i = 0; i < 49; i++)
    map_2.put(i, "World");
```

我们创建了两个MVMap，一个含有48组数据，另一个含有49组。



48keys的数据结构



49keys的数据结构

从上面两幅图我们可以看到，`map_1`的根结点的类型是`Leaf`，存储了48组数据；而`map_2`的根结点类型是`NonLeaf`，其下有两个孩子结点，由此得证。

`keysPerPage`这个数设置得相当大，这保证了MVMap树的层数一般不超过3层，查找效率很高。

此外，MVStore的Map还有R树的实现：`MVRTreeMap`。而这种数据结构并不常用，这里不展开阐述。

2.1.2 block和Chunk

MVStore可以将数据持久化到硬盘，将数据存储在一个文件里。因此，我们需要对存储文件的数据进行分析。

首先来看存储文件的格式：

```
[ file header 1 ] [ file header 2 ] [ chunk ] [ chunk ] ... [ chunk ]
```

比较奇特的是，存储文件有两个文件头。官方文档这样解释：文件头更新的时候写操作可能会失败，从而损坏一个文件头，因此用两个文件头以作备用。

首先来了解一下`block`。`block`并不是某一具体的对象或类。实际上，`block`只是对存储空间的一个划分：我们将存储文件划分成整数个块，每一块我们就可以称之为`block`。`block`的大小在文件头中有定义。

关于文件头，以下是一个文件头的描述：

```
H:2,block:2,blockSize:1000,chunk:1,clean:1,created:184a7c079cd,format:2,version:1,
fletcher:8e4ba0e2
```

分析以下这些字段的意思：

- H：值固定为2，代表H2。
- block：最新block的起始数。（chunk会更新，后面将会介绍）
- blockSize：block的大小（用16进制表示——实际上这里所有的数均为16进制，单位为byte）
- chunk：chunk的id号（通常与version一致）
- clean：这个字段取决于上一次使用数据库是否完全关闭。如果上次使用未完全关闭（此时没有该字段），则尝试恢复。
- format：文件格式号。
- version：最新版本号。
- fletcher：弗莱彻校验和。

同时，文件头自身也占一个block。这一点很容易验证：

```
Address  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f Dump
00000000 48 3a 32 2c 62 6c 6f 63 6b 3a 39 2c 62 6c 6f 63 H:2,block:9,bloc
00000010 6b 53 69 7a 65 3a 31 30 30 30 2c 63 68 75 6e 6b kSize:1000,chunk
00000020 3a 38 2c 63 72 65 61 74 65 64 3a 31 38 34 61 37 :8,created:184a7
00000030 63 30 37 39 63 64 2c 66 6f 72 6d 61 74 3a 32 2c c079cd,format:2,
00000040 76 65 72 73 69 6f 6e 3a 38 2c 66 6c 65 74 63 68 version:8,fletch
00000050 65 72 3a 31 38 63 36 37 61 38 31 0a 00 00 00 00 er:18c67a81.....
```

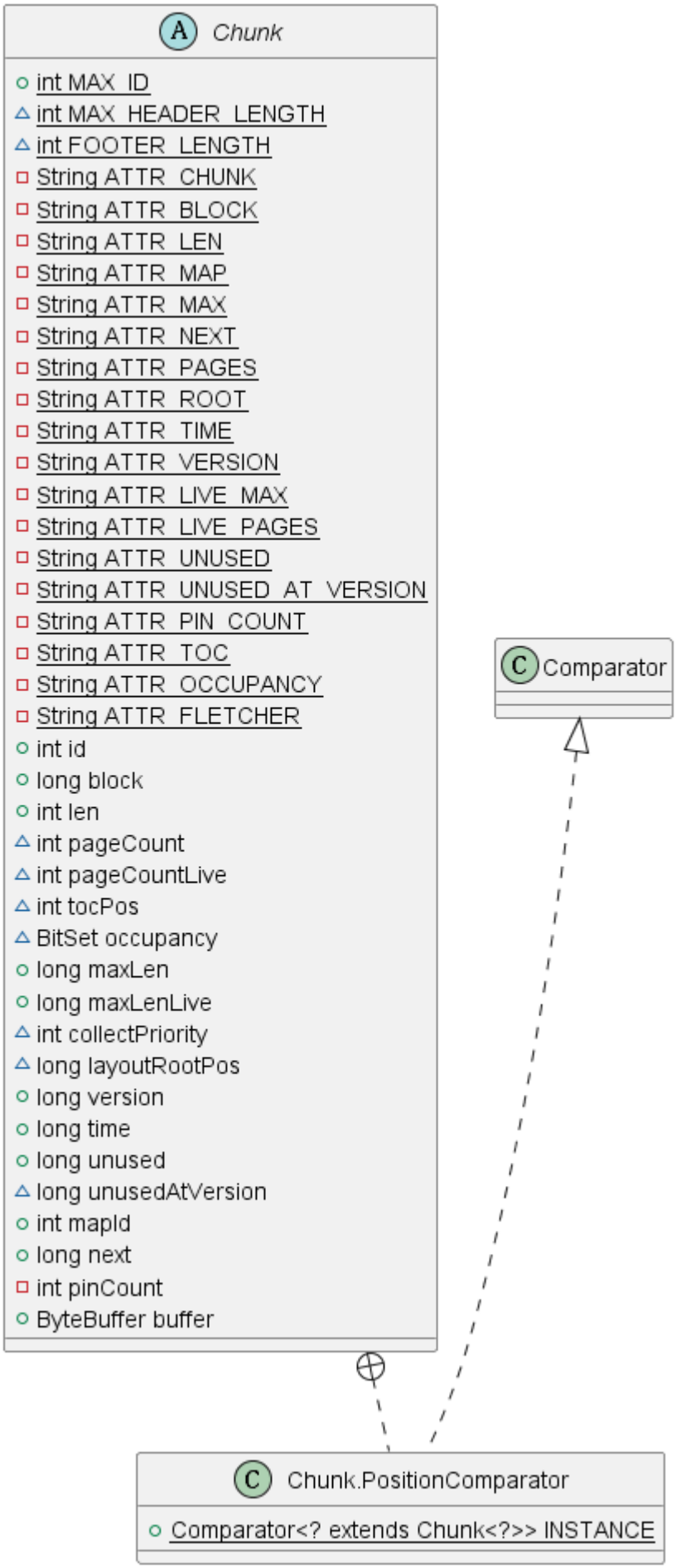
第一个文件头，首地址0x0000

```
00001000 48 3a 32 2c 62 6c 6f 63 6b 3a 39 2c 62 6c 6f 63 H:2,block:9,bloc
00001010 6b 53 69 7a 65 3a 31 30 30 30 2c 63 68 75 6e 6b kSize:1000,chunk
00001020 3a 38 2c 63 72 65 61 74 65 64 3a 31 38 34 61 37 :8,created:184a7
00001030 63 30 37 39 63 64 2c 66 6f 72 6d 61 74 3a 32 2c c079cd,format:2,
00001040 76 65 72 73 69 6f 6e 3a 38 2c 66 6c 65 74 63 68 version:8,fletch
00001050 65 72 3a 31 38 63 36 37 61 38 31 0a 00 00 00 00 er:18c67a81.....
```

第二个文件头，首地址0x1000

两个文件头首地址之差正好是一个block的大小。

文件头用来描述文件的重要属性，Chunk用来存储数据内容。Chunk的成员变量如下所示：



Chunk的成员变量（PlantUML绘制）

注意到这里的Chunk为抽象类，它有两个继承类：SFChunk和MFChunk，分别代表单文件（SingleFile）和多文件（MultiFile）的Chunk。在这里我们只讨论单文件存储（这也是MVStore的默认持久化方式）的情形。

直接看Chunk的成员变量有点抽象，官方文档给出了Chunk在文件中的格式：

```
[ header ] [ page ] [ page ] ... [ page ] [ footer ]
```

我们可以看到，Chunk含有头（header）和脚（footer）。header的作用依旧是给出本Chunk的重要属性，footer则主要用于校验。以下给出一个header和footer的例子：

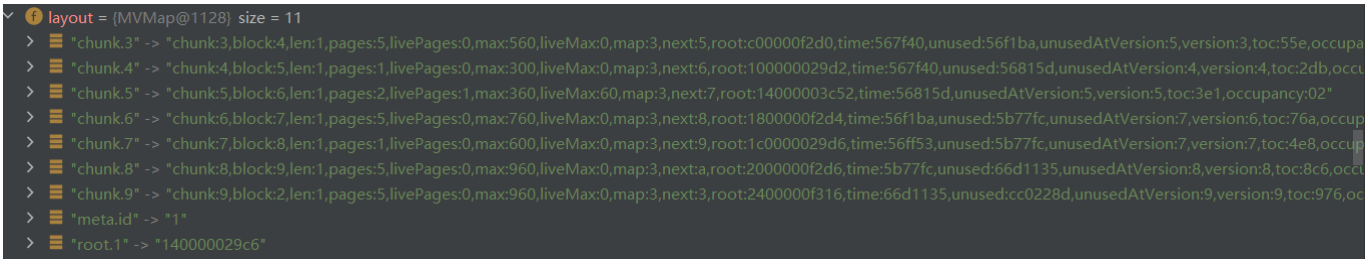
```
chunk:1,len:1,pages:6,max:420,map:3,root:4000010446,time:18,version:1,next:3,toc:4
5b
chunk:1,len:1,version:1,fletcher:90d3728c
```

在MVStore中，一个Chunk保存一个版本。MVStore的特色就是多版本存储，每个版本都是以Chunk的形式保存。可以粗略地理解为：有多少个版本，就有多少个Chunk。同时，MVStore采用日志化结构存储，在文件头中添加索引等方式寻址（例如指向最新版本的version字段）。实际上，commit方法更新数据库也是按Chunk保存的：每次commit相当于更新一次版本，也即增加一个Chunk。

2.1.3 元数据

元数据指的是描述数据的数据。在MVStore中有两个MVMap类型的元数据：meta和layout。笔者认为，直接给出图例能更方便地理解这两个对象：

meta示例



layout示例

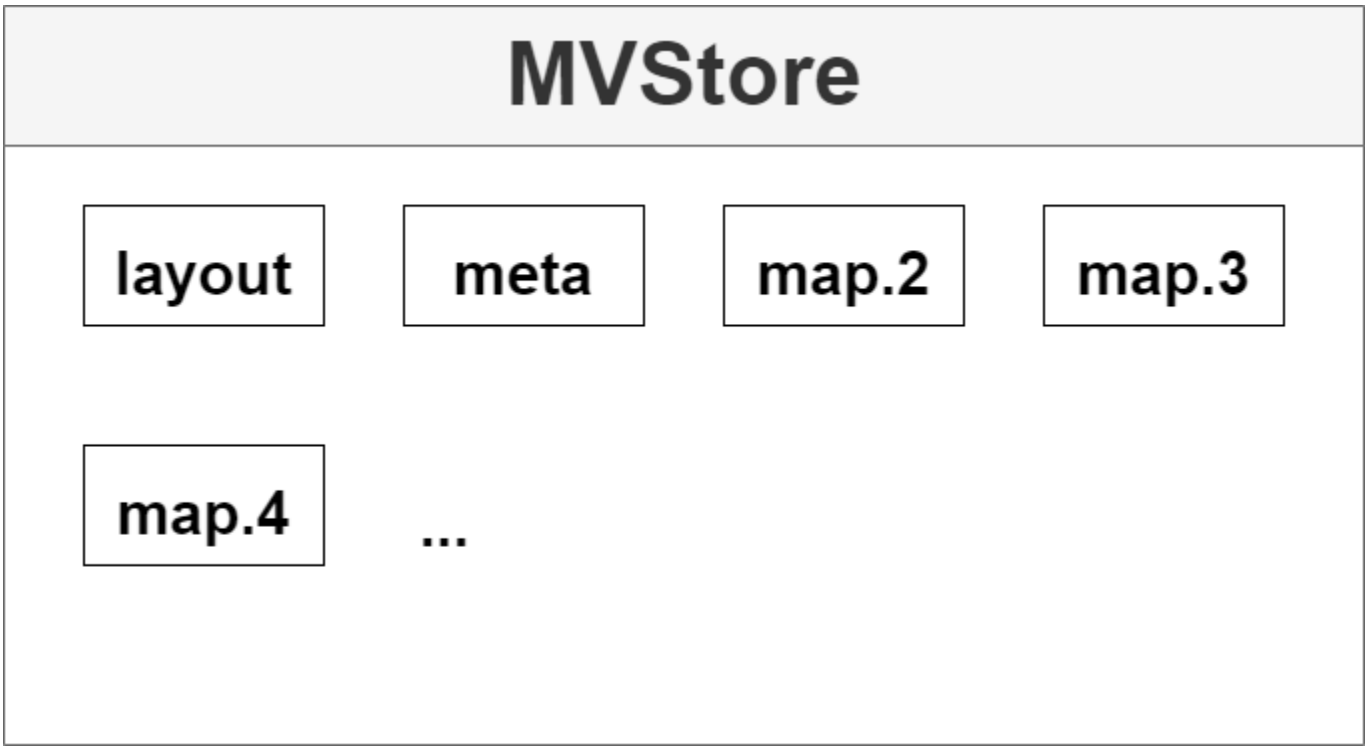
如上所示，meta是一个键值均为String类型的MVMap。它存储了所有MVMap数据的键值分别为id->name和name->id的键值对。（id：MVMap的id号；name：MVMap的名称）

而layout则更近一层，它描述的是文件存储的Chunk信息和MVMap信息（包括meta）。显而易见的是，layout在内存模式下不会存在。在图中我们可以看到，layout展示了chunk.id为2之后的所有Chunk信息(这

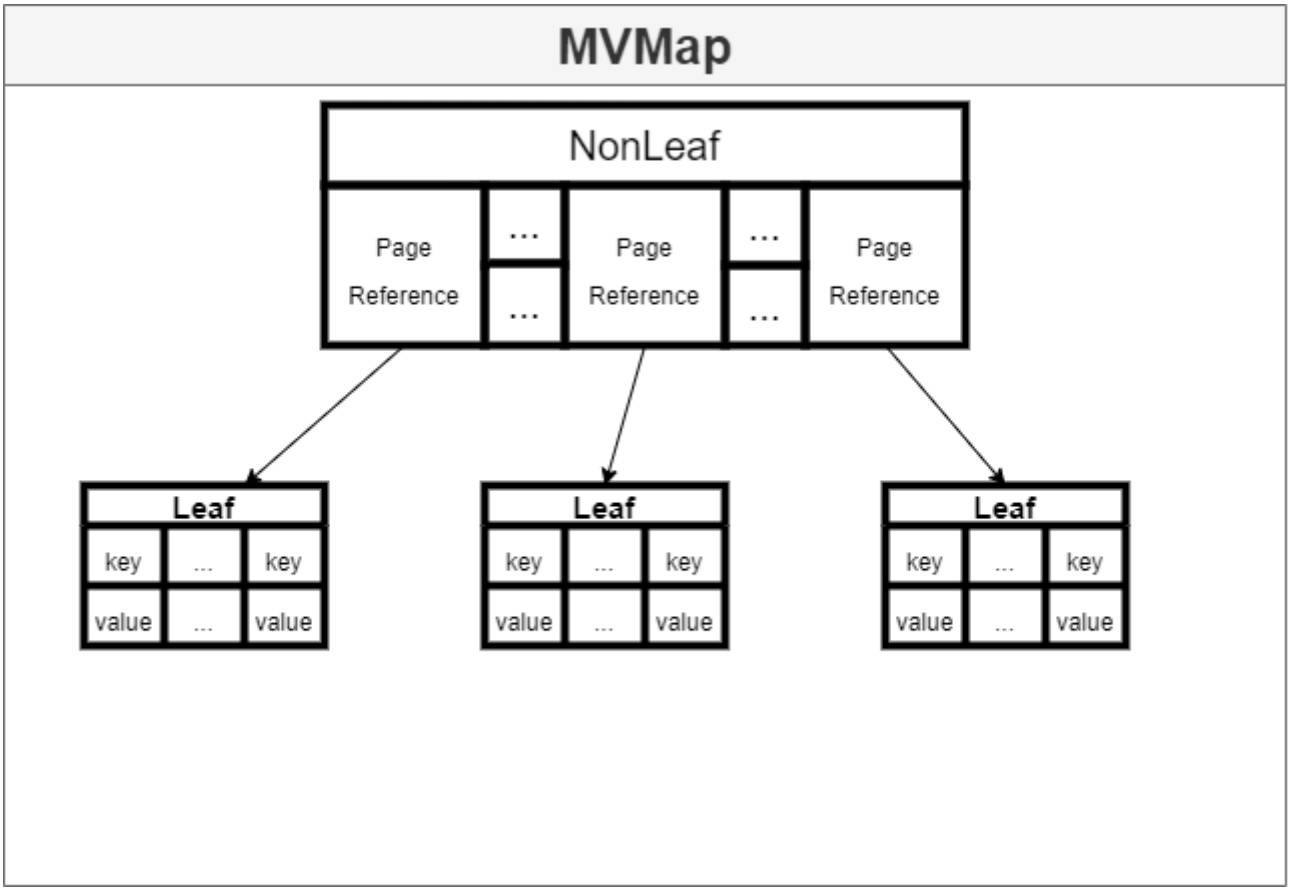
一点很好理解，因为`chunk.1`和`chunk.2`是两个文件头)。同时也解释了为什么`meta`存储的MVMap的id从2开始：`meta`的id为1。`root.id`表示每个MVMap的根结点，后面的`pos`表示地址，方便进行增删改查操作。

2.2 MVStore的结构图

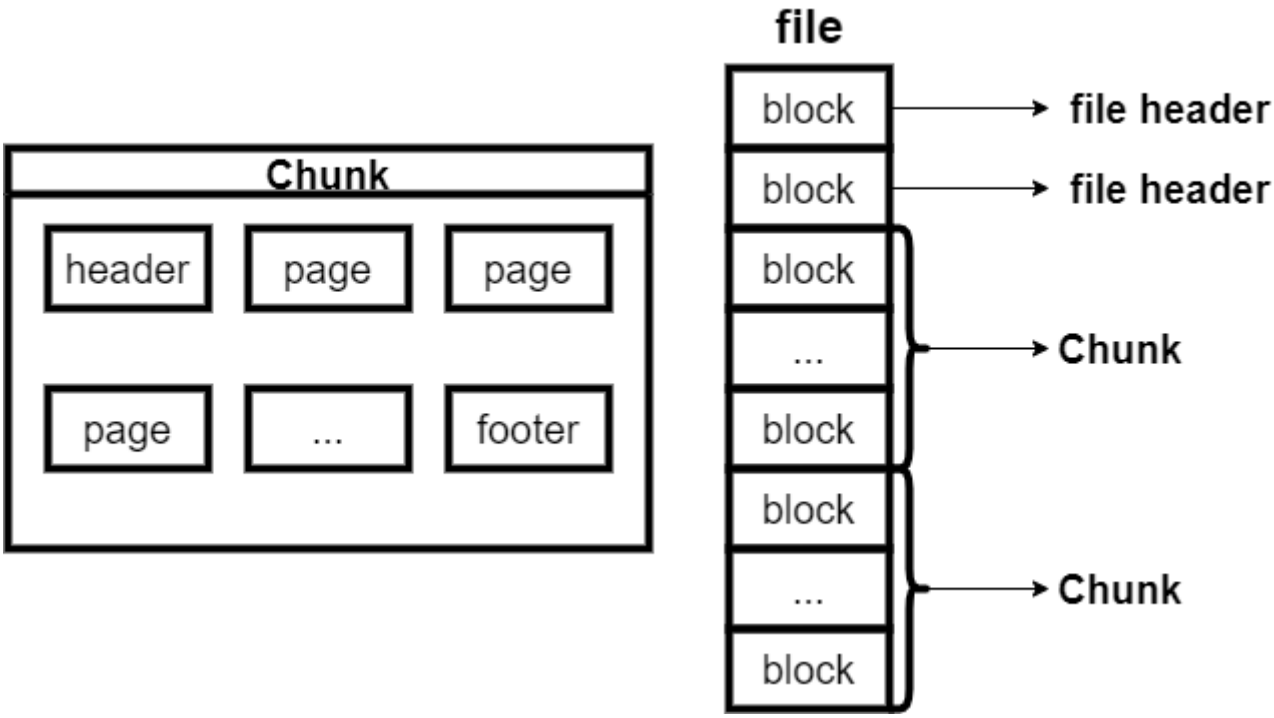
根据以上分析，我们可以大致画出MVStore的结构图。（只展示重要部分）



MVStore结构图



MVMap结构图



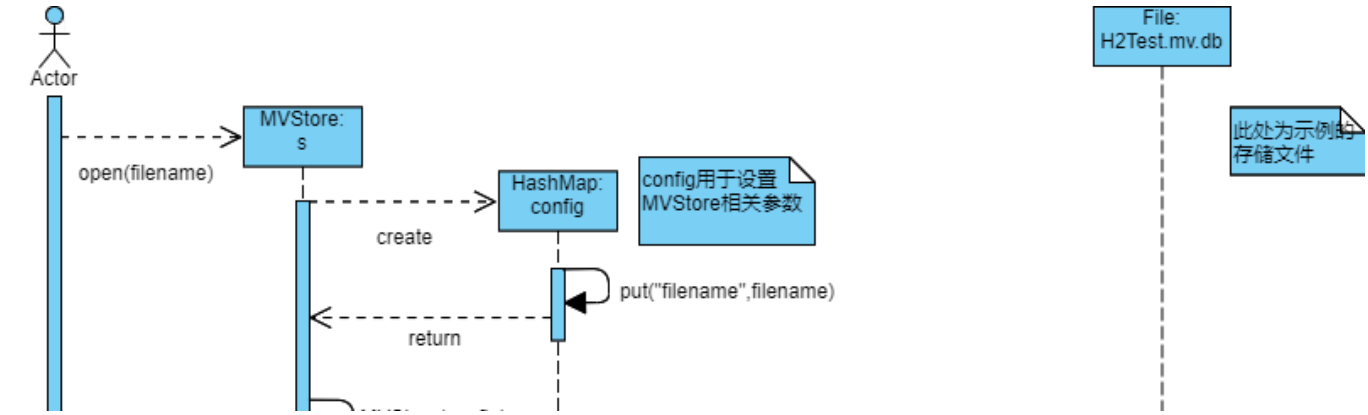
存储文件结构图

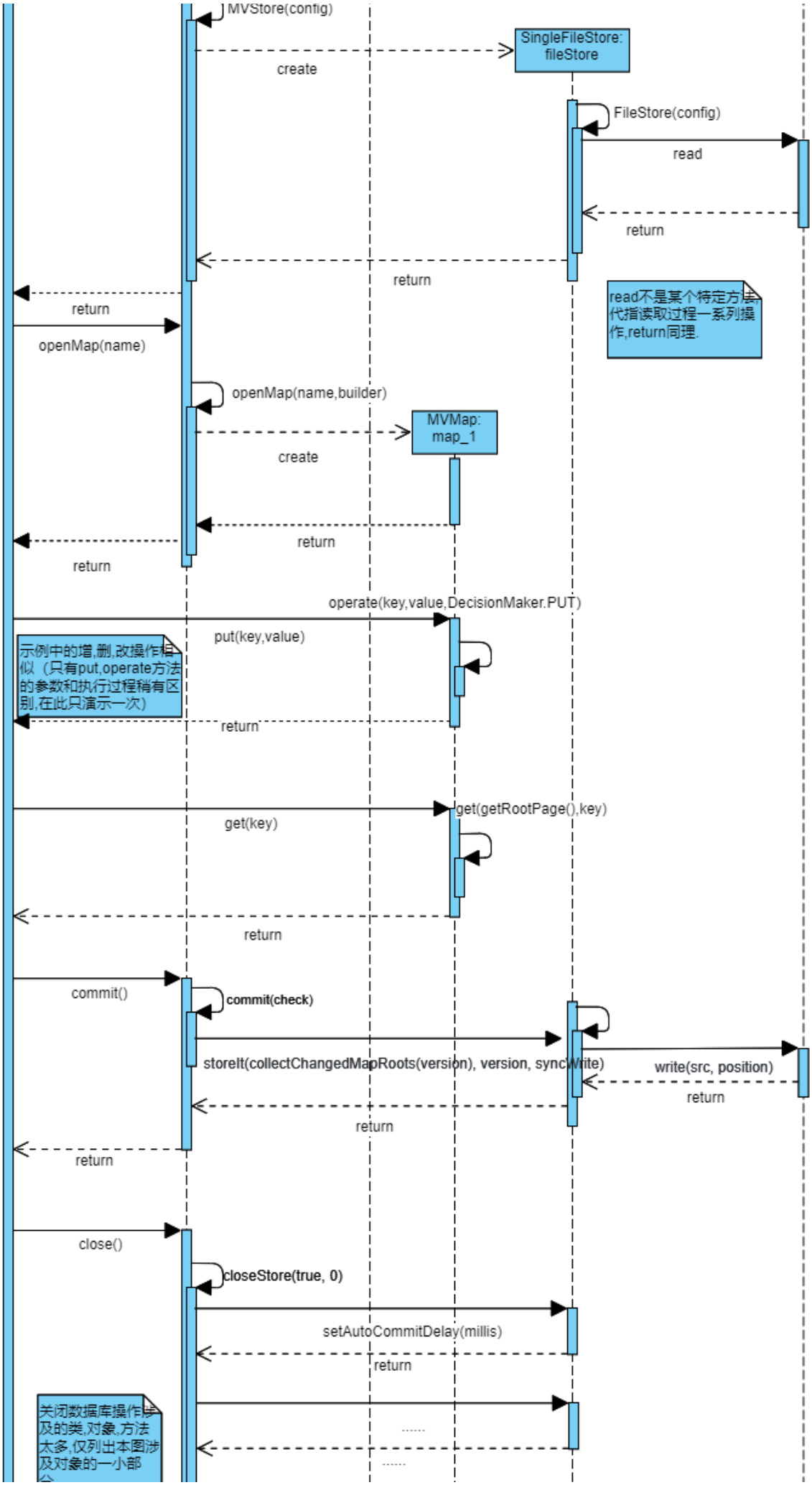
3.MVStore时序图

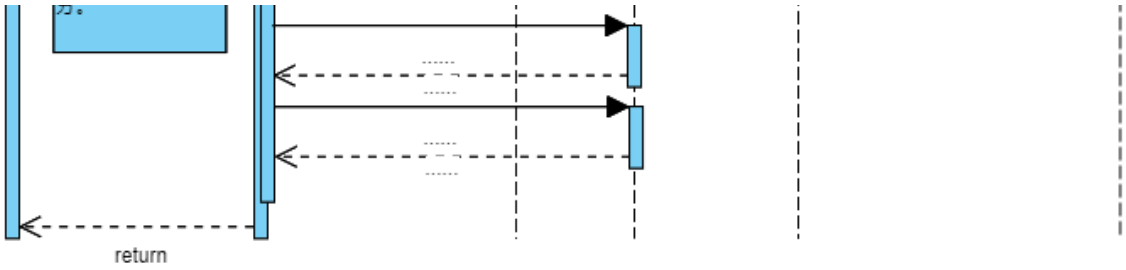
最后以一个简单例子为例，展示MVStore工作的时序图。

```
public static void main(String[] args) throws Exception {
    MVStore s = MVStore.open("E:/Java/H2Test.mv.db");
    MVMap<Integer, String> map_1 = s.openMap("map_1");
    map_1.put(2,"Winter");
    map_1.put(3,"Summer");
    map_1.put(3,"Autumn");
    map_1.remove(3);
    System.out.println(map_1.get(2));
    s.commit();
    s.close();
}
```

时序图如下所示：（忽略了许多类和操作方法，仅展示重要部分）




MVStore(config)
SingleFileStore:
fileStore
create
FileStore(config)
read
return
return
read不是某个特定方法,代指读取过程一系列操作,return同理.
return
openMap(name)
openMap(name,builder)
MVMap:
map_1
create
return
return
operate(key,value,DecisionMaker.PUT)
put(key,value)
示例中的增,删,改操作相似（只有put,operate方法的参数和执行过程稍有区别,在此只演示一次）
return
get(getRootPage(),key)
get(key)
return
commit()
commit(check)
storeIt(collectChangedMapRoots(version), version, syncWrite)
write(src, position)
return
return
return
close()
closeStore(true, 0)
setAutoCommitDelay(millis)
return
关闭数据库操作涉及的类,对象,方法太多,仅列出本图涉及对象的一小部



MVStore示例时序图