

Btrfs vs ZFS 实现 snapshot 的差异



目次

- Btrfs 的子卷 (subvolume) 和快照 (snapshot)
 - 子卷 (subvolume) 和快照 (snapshot) 的术语
 - 于是子卷在存储介质中是如何记录的呢？
 - 那么快照又是如何记录的呢？

- ZFS 的数据集 (dataset)、快照 (snapshot)、克隆 (clone) 及其它
 - 数据集 (dataset)
 - 快照 (snapshot)
 - 克隆 (clone)

Btrfs 和 ZFS 都是开源的写时拷贝 (Copy on Write, CoW) 文件系统，都提供了相似的子卷管理和 快照 (snapshot) 的功能。网上有不少文章都评价 ZFS 实现 CoW FS 的创新之处，进而想说「Btrfs 只是 Linux/GPL 阵营对 ZFS 的拙劣抄袭」。或许（在存储领域人尽皆知而在领域外）鲜有人知，在 ZFS 之前就有 NetApp 的商业产品 WAFL(Write Anywhere File Layout) 实现了 CoW 语义的文件系统，并且集成了快照和卷管理之类的功能。描述 btrfs 原型设计的 论文 和 发表幻灯片 也明显提到 WAFL 比提到 ZFS 更多一些，应该说 WAFL 这样的企业级存储方案才是 ZFS 和 btrfs 共同的灵感来源，而无论是 ZFS 还是 btrfs 在其设计中都汲取了很多来自 WAFL 的经验教训。

我一开始也带着「Btrfs 和 ZFS 都提供了类似的功能，因此两者必然有类似的设计」这样的先入观念，尝试去使用这两个文件系统，却经常撞上两者细节上的差异，导致使用时需要不尽相同的工作流，或者看似相似的用法有不太一样的性能表现，又或者一边有的功能（比如 ZFS 的 inband dedup，Btrfs 的 reflink）在另一边没有的情况。

为了更好地理解这些差异，我四处搜罗这两个文件系统的实现细节，于是有了这篇笔记，记录一下我查到的种种发现和自己的理解。（或许会写成一个系列？还是先别乱挖坑不填。）只是自己的笔记，所有参阅的资料文档都是二手资料，没有深挖过源码，还参杂了自己的理解，于是难免有和事实相违的地方，如有写错，还请留言纠正。

Btrfs 的子卷 (subvolume) 和快照 (snapshot)

先从两个文件系统中（表面上看起来）比较简单的 btrfs 的子卷 (subvolume) 和快照 (snapshot) 说起。关于子卷和快照的常规用法、推荐布局之类的话题就不细说了，网上能找到很多不错的资料，比如 [btrfs wiki 的 SysadminGuide 页](#) 和 [Arch wiki 上 Btrfs#Subvolumes 页](#) 都有不错的参考价值。

子卷 (subvolume) 和快照 (snapshot) 的术语

在 btrfs 中，存在于存储媒介中的只有「子卷」的概念，「快照」只是个创建「子卷」的方式，换句话说在 btrfs 的术语里，子卷 (subvolume) 是个名词，而快照 (snapshot) 是个动词。如果脱离了 btrfs 术语的上下文，或者不精确地称呼的时候，也经常有文档把 btrfs 的快照命令创建出的子卷叫做一个快照，所以当提到快照的时候，根据上下文判断这里是个动词还是名词，把名词的快照当作用快照命令创建出的子卷就可以了。或者我们可以理解为，**互相共享一部分元数据**

(metadata) 的子卷互为彼此的快照 (名词)，那么按照这个定义的话，在 btrfs 中创建快照 (名词) 的方式其实有两种：

1. 用 `btrfs subvolume snapshot` 命令创建快照
2. 用 `btrfs send` 命令并使用 `-p` 参数发送快照，并在管道另一端接收

`btrfs send` 命令的 `-p` 与 `-c`

这里也顺便提一下 `btrfs send` 命令的 `-p` 参数和 `-c` 参数的差异。只看 `btrfs-send(8)` 的描述的话：

`-p <parent>`

send an incremental stream
from parent to subvol

`-c <clone-src>`

use this snapshot as a clone
source for an incremental
send (multiple allowed)

看起来这两个都可以用来生成两个快照之间的差分，只不过 `-p` 只能指定一个「parent」，而 `-c` 能指定多个「clone source」。在 [unix stackexchange](#) 上有人写明了这两个的异同。使用 `-p` 的时候，产生的差分首先让接收端用 `subvolume snapshot` 命令对 parent 子卷创建一个快照，然后发送指令将这个快照修改成目标子卷的样子，而使用 `-c` 的时候，首先在接收端用 `subvolume create` 创建一个空的子卷，随后发送指令在这个子卷中填充内容，其数据块尽量共享 clone source 已有的数据。所以 `btrfs send -p` 在接收端产生是有共享元数据的快照，而 `btrfs send -c` 在接收端产生的是仅仅共享数据而不共享元数据的子卷。

定义中「互相共享一部分 **元数据**」比较重要，因为除了快照的方式之外，btrfs 的子卷间也可以通过 reflink 的形式共享数据块。我们可以对一整个子卷（甚至目录）执行 `cp -r --reflink=always`，创建出一个副本，副本的文件内容通过 reflink 共享原本的数据，但不共享元数据，这样创建出的就不是快照。

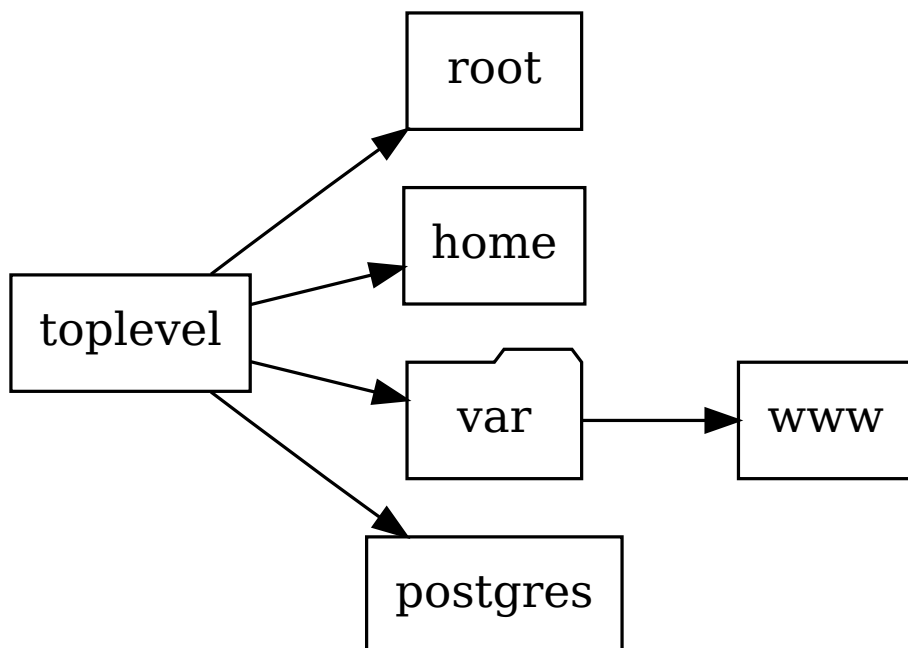
说了这么多，其实关键的只是 btrfs 在传统 Unix 文件系统的「目录/文件/inode」这些东西之外只增加了一个「子卷」的新概念，而子卷间可以共享元数据或者数据，用快照命令创建出的子卷就是共享一部分元数据。

于是子卷在存储介质中是如何记录的呢？

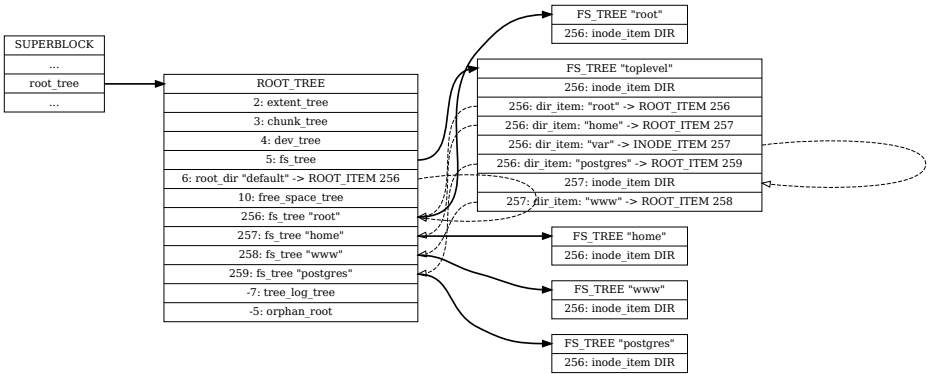
比如在 SysadminGuide 这页的 Flat 布局 有个子卷布局的例子。

```
toplevel          (volume root direc
tory, not to be mounted by default)
  +-- root         (subvolume root
directory, to be mounted at /)
  +-- home         (subvolume root
directory, to be mounted at /home)
  +-- var          (directory)
    |  \-- www     (subvolume root
directory, to be mounted at /var/ww
w)
      \-- postgres (subvolume root
directory, to be mounted at /var/li
b/postgresql)
```

用圆柱体表示子卷的话画成图大概是这个样子：



首先要说明， btrfs 中大部分长度可变的数据结构都是 CoW B-tree ，一种经过修改适合写时拷贝的B树结构，所以在 on-disk format 中提到了很多个树。这里的树不是指文件系统中目录结构树，而是 CoW B-tree ，如果不关心B树细节的话可以把 btrfs 所说的一棵树理解为关系数据库中的一个表， 和数据库的表一样 btrfs 的树的长度可变，然后表项内容根据一个 key 排序。有这样的背景之后，上图例子中的 Flat 布局在 btrfs 中大概是这样的数据结构：



上图中已经隐去了很多和本文无关的具体细节，所有这些细节都可以通过 `btrfs inspect-internal dump-super` 和 `dump-tree` 查看到。btrfs 中的每棵树都可以看作是一个数据库中的表，可以包含很多表项，根据 KEY 排序，而 KEY 是 (object_id, item_type, item_extra) 这样的三元组。每个对象 (object) 在树中用一个或多个表项 (item) 描述，同 object_id 的表项共同描述一个对象 (object)。B 树中的 key 只用来比较大小不必连续，从而 object_id 也不必连续，只是按大小排序。有一些预留的 object_id 不能用作别的用途，他们的编号范围是 -255ULL 到 255ULL，也就是表中前 255 和最后 255 个编号预留。

ROOT_TREE 中记录了到所有别的 B 树的指针，在一些文档中叫做 tree of tree roots。「所有别的 B 树」举例来说比如 2 号 extent_tree，3 号 chunk_tree，4 号 dev_tree，10 号 free_space_tree，这些 B 树都是描述 btrfs 文件系统结构非常重要的组成部分，但是在本文关

系不大，今后有机会再讨论它们。在 ROOT_TREE 的 5 号对象有一个 fs_tree，它描述了整个 btrfs pool 的顶级子卷，也就是图中叫 toplevel 的那个子卷（有些文档用定冠词称 the FS_TREE 的时候就是在说这个 5 号树，而不是别的子卷的 FS_TREE）。除了顶级子卷之外，别的所有子卷的 object_id 在 256ULL 到 -256ULL 的范围之间，对子卷而言 ROOT_TREE 中的这些 object_id 也同时是它们的子卷 id，在内核挂载文件系统的时候可以用 subvolid 找到它们，别的一些对子卷的操作也可以直接用 subvolid 表示一个子卷。ROOT_TREE 的 6 号对象描述的不是一棵树，而是一个名叫 default 的特殊目录，它指向 btrfs pool 的默认挂载子卷。最初 mkfs 的时候，这个目录指向 ROOT_ITEM 5，也就是那个顶级子卷，之后可以通过命令 btrfs subvolume set-default 修改它指向别的子卷，这里它被改为指向 ROOT_ITEM 256 亦即那个名叫 "root" 的子卷。

每一个子卷都有一棵自己的 FS_TREE（有的文档中叫 file tree），一个 FS_TREE 相当于传统 Unix 文件系统的一整个 inode table，只不过它除了包含 inode 信息之外还包含所有文件夹内容。在 FS_TREE 中，object_id 同时也是它所描述对象的 inode 号，所以 btrfs 的 **子卷有互相独立的 inode 编号**，不同子卷中的文件或目录可以拥有相同的 inode。FS_TREE 中一个目录用一个 inode_item 和多个 dir_item 描述，inode_item 是目录自己的 inode，那些 dir_item 是目录的内容。dir_item 可以指向别的 inode_item 来描述普通文件和子目录，也可以指向 root_item 来描述这个目录指向一个子卷。有人或许疑惑，子卷就没有自己的

inode 么？其实如果看 数据结构定义 的话 `struct btrfs_root_item` 结构在最开头的地方包含了一个 `struct btrfs_inode_item` 所以 `root_item` 也同时作为子卷的 inode，不过用户通常看不到这个子卷的 inode，因为子卷在被（手动或自动地）挂载到目录上之后，用户会看到的是子卷的根目录的 inode。

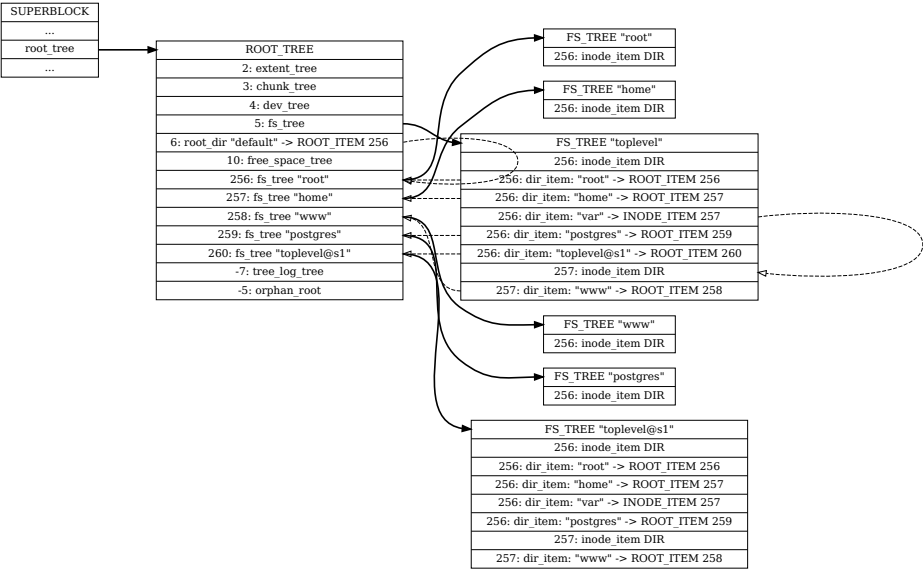
比如上图 FS_TREE toplevel 中，有两个对象，第一个 256 是（子卷的）根目录，第二个 257 是 "var" 目录，256 有 4 个子目录，其中 "root" "home" "postgres" 这三个指向了 ROOT_TREE 中的对应子卷，而 "var" 指向了 inode 257。然后 257 有一个子目录叫 "www" 它指向了 ROOT_TREE 中 object_id 为 258 的子卷。

那么快照又是如何记录的呢？

以上是子卷、目录、inode 在 btrfs 中的记录方式，你可能想知道，如何记录一个快照呢？特别是，如果对一个包含子卷的子卷创建了快照，会得到什么结果呢？如果我们在上面的布局基础上执行：

```
btrfs subvolume snapshot toplevel toplevel/toplevel@sl
```

那么产生的数据结构大概如下所示：



在 ROOT_TREE 中增加了 260 号子卷，其内容复制自 toplevel 子卷，然后 FS_TREE toplevel 的 256 号 inode 也就是根目录中增加一个 dir_item 名叫 *toplevel@s1* 它指向 ROOT_ITEM 的 260 号子卷。这里看似是完整复制了整个 FS_TREE 的内容，这是因为 CoW b-tree 当只有一个叶子节点时就复制整个叶子节点。如果子卷内容再多一些，除了叶子之外还有中间节点，那么只有被修改的叶子和其上的中间节点需要复制。从而创建快照的开销基本上是 $O(\text{level of FS_TREE})$ ，而 B 树的高度一般都能维持在很低的程度，所以快照创建速度近乎是常数开销。

从子卷和快照的这种实现方式，可以看出：**虽然子卷可以嵌套子卷，但是对含有嵌套子卷的子卷做快照的语义有些特别**。上图中我没有画 *toplevel@s1* 下的各个子卷到对应 ROOT_ITEM 之间的虚线箭头，是因为这时候如果你尝试直接跳过 *toplevel* 挂载 *toplevel@s1* 到挂载点，会发现那些子卷没有被自动挂载，更奇怪的是那些子卷的目录项也不是个普通目录，尝试往它们中放东西会得到无权访问的错误，对它们能做的唯一事情是手动将别的子卷挂载在上面。推测原因在于这些子目录并不是真的目录，没有对应的目录的 inode，试图查看它们的 inode 号会得到 2 号，而这是个保留号不应该出现在 btrfs 的 inode 号中。每个子卷创建时会记录包含它的上级子卷，用 `btrfs subvolume list` 可以看到每个子卷的 top level subvolid，猜测当挂载 A 而 A 中嵌套的 B 子卷记录的上级子卷不是 A 的时候，会出现上述奇怪行为。嵌套子卷的快照还有一些别的奇怪行为，大家可以自己探索探索。

建议用平坦的子卷布局

因为上述嵌套子卷在做快照时的特殊行为，我个人建议是 **保持平坦的子卷布局**，也就是说：

1. 只让顶层子卷包含其它子卷，除了顶层子卷之外的子卷只做手工挂载，不放嵌套子卷
2. 只在顶层子卷对其它子卷做快照，不快照顶层子卷
3. 虽然可以在顶层子卷放子卷之外的东西（文

件或目录），不过因为想避免对顶层子卷做快照，所以避免在顶层子卷放普通文件。

btrfs 的子卷可以设置「可写」或者「只读」，在创建一个快照的时候也可以通过 `-r` 参数创建出一个只读快照。通常只读快照可能比可写的快照更有用，因为 `btrfs send` 命令只接受只读快照作为参考点。子卷可以有两种方式切换它是否只读的属性，可以通过 `btrfs property set <subvol> ro` 直接修改是否只读，也可以对只读子卷用 `btrfs subvolume snapshot` 创建出可写子卷，或者反过来对可写子卷创建出只读子卷。

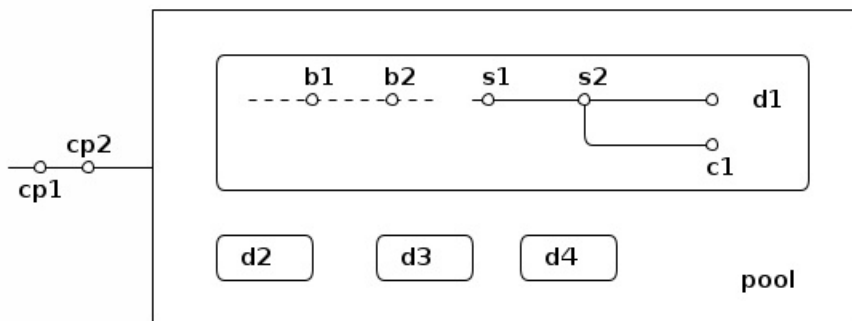
只读快照也有些特殊的限制，在 [SysadminGuide#Special_Cases](#) 就提到一例，你不能把只读快照用 `mv` 移出包含它的目录，虽然你能用 `mv` 给它改名或者移动包含它的目录到别的地方。btrfs wiki 上给出这个限制的原因是子卷中记录了它的上级，所以要移动它到别的上级需要修改这个子卷，从而只读子卷没法移动到别的上级（不过我还没搞清楚子卷在哪儿记录了它的上级，记录的是上级目录还是上级子卷）。不过这个限制可以通过对只读快照在目标位置创建一个新的只读快照，然后删掉原位置的只读快照来解决。

ZFS 的数据集 (dataset)、快照 (snapshot)、克隆 (clone) 及其它

Btrfs 给传统文件系统只增加了子卷的概念，相比之下 ZFS 中类似子卷的概念有好几个，据我所知有这些：

- 数据集 (dataset)
- 快照 (snapshot)
- 克隆 (clone)
- 书签 (bookmark)：从 ZFS on Linux v0.6.4 开始
- 检查点 (checkpoint)：从 ZFS on Linux v0.8.0 开始

梳理一下这些概念之间的关系也是最初想写下这篇笔记的初衷。先画个简图，随后逐一讲讲这些东西：



数据集 (dataset)

先从最简单的概念说起。在 ZFS 的术语中，把底层管理和释放存储设备空间的叫做 ZFS 存储池 (pool)，简称 zpool，其上可以创建多个数据集 (dataset)。容易看出数据集的概念直接对应 btrfs 中的子卷。也有很多 ZFS 的文档中把一个数据集 (dataset) 叫做一个文件系统 (filesystem)，这或许是想要和（像 Solaris 的 SVM 或者 Linux 的 LVM 这样的）传统的卷管理器与其上创建的多个文件系统（Solaris UFS 或者 Linux ext）这样的上下层级做类比。从 btrfs 的子卷在内部结构中叫作 FS_TREE 这一点可以看出，至少在 btrfs 早期设计中大概也是把子卷称为 filesystem 做过类似的类比的。

与 btrfs 的子卷不同的是，ZFS 的数据集之间是完全隔离的，（除了后文会讲的 dedup 方式之外）不可以共享任何数据或者元数据。一个数据集还包含了隶属于其中的快照 (snapshot)、克隆 (clone) 和书签 (bookmark)。在 btrfs 中一个子卷和对其创建的快照之间虽然有父子关系，但是平级的关系。

快照 (snapshot)

ZFS 的快照对应 btrfs 的只读快照，是标记数据集在某一历史时刻上的只读状态。和 btrfs 的只读快照一样，ZFS 的快照也兼作 send/receive 时的参考点。

ZFS 中快照是排列在一个时间线上的，因为都是只读快照，它们是数据集在历史上的不同时间点。这里说的时间不是系统时钟的时间，而是 ZFS 中事务组（TXG, transaction group）的一个序号。整个 ZFS pool 的每次写入会被合并到一个事务组，对事务组分配一个严格递增的序列号，提交一个事务组具有类似数据库中事务的语义：要么整个事务组都被完整提交，要么整个 pool 处于上一个事务组的状态，即使中间发生突然断电之类的意外也不会破坏事务语义。因此 ZFS 快照就是数据集处于某一个事务组时的状态。

如果不满足于对数据集进行的修改，想把整个数据集恢复到之前的状态，那么可以回滚（rollback）数据集到一个快照。回滚操作会撤销掉对数据集的所有更改，并且默认参数下只能回滚到最近的一个快照。如果想回滚到更早的快照，可以先删掉最近的几个，或者可以使用 `zfs rollback -r` 参数删除中间的快照并回滚。

除了回滚操作，还可以直接只读访问到快照中的文件。ZFS 的数据集中有个隐藏文件夹叫 `".zsh"`，所以如果只想回滚一部分文件，可以从 `".zsh/snapshot/SNAPSHOT-NAME"` 中把需要的文件复制出来。

克隆（clone）

ZFS 的克隆有点像 btrfs 的可写快照。因为 ZFS 的快照是只读的，如果想对快照做写入，那需要先用 `zfs clone` 从快照中建出一个克隆，创建出的克隆和快照共享元数据和数据。创建了克隆之后，作为克隆参考点的快照会成为克隆的父亲，克隆存在期间无法删除掉作为其父亲的快照。

一个数据集可以有多个克隆

可以看出和 btrfs 相比，ZFS 的快照有更多限制，而 ZFS 快照允许的操作都可以在 btrfs 中通过 文件系统操作 进行