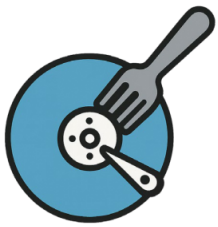
第 1 页

Forkable Virtual Disk (FVD) Specification



Version 1.0 (04/10/2025)

Clarifications and changes since the initial release of this specification are in red.

Copyright

Introduction

This specification describes Forkable Virtual Disk (FVD) image format. It does not explain how hard disks interface with virtual machines, nor does it provide information about ATA (AT Attachment) hard disks or Small Computer System Interface (SCSI) hard disks. This paper focuses on how to store the data in files on the host filesystem.

The reader should be familiar with hard disk technologies and should understand how data is accessed and laid out on the physical medium. The following terminology is used in this paper:

Virtual Disk

A virtual device exposed to the user that has all properties of and provides the same interfaces as a physical disk.

Disk Image/Backing File

File(s) which store the data used by a virtual disk, along with metadata. In the case of FVD, a disk image or backing file consists of a disk container file and a refcount metadata file.

Disk Container File

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

下面把这张截图（文档首页）的意思，用**面向初学者**的方式分点讲清楚：

这是什么文档?

- **标题**：Forkable Virtual Disk (FVD) Specification

  中文可理解为“**可分叉虚拟磁盘（FVD）规范**”。
- **用途**：这是在说明一种虚拟磁盘文件格式——如何把虚拟磁盘的数据与元数据存到宿主机文件系统里的**技术规范**（规则说明书）。
- **版本/日期**：Version 1.0（2025-10-04）。
- **提示**：红色文字表示和最初版本相比的**澄清或变更。**

版权与保密

这份规范讲什么、不讲什么?

- **讲什么**：只讲**FVD镜像格式**本身——也就是**磁盘数据怎样放到文件里**、需要哪些伴随信息（元数据）等。
- **不讲什么**：不讨论硬盘如何与虚拟机相连（如 ATA、SCSI 等接口）——这些是**设备接口层**的问题，这里不涉及。

阅读这份文档需要什么背景?

- 需要对**硬盘基本原理**有点了解，例如：数据如何按块/扇区存放、如何寻址等。

文中出现的关键术语（入门解释）

1. **Virtual Disk（虚拟磁盘）**

- 就像一块“假的”硬盘：对用户/系统来说，它**看起来和真的硬盘一样**，能用相同的读写接口。
- 区别在于：它的数据其实**保存在宿主机上的文件**里。

2. **Disk Image / Backing File（磁盘镜像/后备文件）**

- **磁盘镜像**是一个或多个**文件**，里面保存了虚拟磁盘的**数据**和**元数据。**
- 在 FVD 里，一个镜像（也叫**后备文件**，常用于“基线镜像+增量”的场景）由两部分组成：

```
 * **Disk Container File（磁盘容器文件）**：装真正数据块的“容器”。

 * **Refcount Metadata File（引用计数元数据文件）**：记录每个数据块被引用了多少次等信息，常用于**写时复制（Copy-on-Write）**、快照、去重等操作时正确管理和回收数据块。
```

- 你可以把它理解成：**数据在盒子里（容器文件）**，而**盒子外贴着一张表（引用计数元数据）**，表上写着每块数据被谁用、用了几次。

3. **Disk Container File（磁盘容器文件）**

- 下一段将要展开定义（截图只显示到标题），一般指**存放数据块本体**的那个大文件。

为什么要有“可分叉（Forkable）”?

- “分叉/派生”意味着可以**从一个已有镜像**创建新的“分支”（类似**快照 -> 派生盘**），新的分支只在**更改的块**上占空间，未更改的块继续**共享。**
- 这样做的好处：

- **省空间**：不复制整盘，只记录变更。
- **速度快**：创建/回滚快照更迅速。
- **易管理**：通过引用计数能安全删除不再被任何分支使用的数据块。

一个直观的小例子

- 你有一个 20GB 的“基线系统盘”（镜像A）。
- 为了做实验，你从它“分叉”出镜像B。
- 只要你不改动，B 几乎不占空间；当你安装软件、更改文件时，B 只写入**变更过的块**到自己的容器文件；
- **引用计数元数据**会记录哪些块仍被A、B共享，哪些是B独有，便于后续清理和快照管理。

如果你愿意，发我**下一页截图**，我可以继续把各个文件结构、字段含义、数据块布局、读写流程等**逐条**讲清楚，并给你**图示/类比**帮助理解。

第 2 页

A file consisting of a series of records, to hold information stored in the virtual disk as well as certain metadata.

Refcount Metadata File

A file consisting of a series of unsigned 8-bit integers, storing the number of references each record in the disk container file has.

Sector

Smallest unit of storage of a disk, and what data is addressed in terms of when referring to the virtual disk. Sector length is always 512 bytes in FVD version 1.

Record

Smallest unit of storage in a FVD disk container file, and what data is addressed in terms of when referring to the disk image/backing file. Record length is always 512 bytes in FVD version 1.

Disk Geometry

How data is organised on a disk in terms of cylinders, heads and sectors per track, used for CHS addressing. The size of the disk in number of sectors may be calculated through number of cylinders times number of heads times number of sectors per track.

Refcount

Short for reference count, the number of entities currently using a particular block of data.

Reserved

Field reserved for future use, should not be written to but can be read from, however the data within bears no meaning and may be anything.

Note

All values in the file format, unless otherwise specified, are stored in network byte order (big endian). All numerical values in this specification are in decimal, unless prefixed with 0x for hexadecimal.

FVD Files

An FVD image consists of a disk container file and a refcount metadata file. Together, they are referred to as an "FVD image". The disk container file usually has the extension `.fvd` (though it may use any extension or none), and the refcount metadata file is always the path to the disk container file plus `.ref`. Example:

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

下面把这页截图（术语+文件规则页）的内容，用**入门者能看懂**的方式分点解释：

一句话总览

这页主要做三件事：

1. 定义一组在 FVD（可分叉虚拟磁盘）里会用到的术语；
2. 说明**数值与字节序**的约定；
3. 解释**FVD 镜像由哪些文件组成、怎么命名。**

术语与概念（逐条）

- **Disk Container File（磁盘容器文件）**

  用很大的“盒子文件”保存虚拟磁盘的数据，文件内部由一串**records（记录）**组成。记录里可以放真正的数据块，也会带一点点元数据（方便管理）。

- **Refcount Metadata File（引用计数元数据文件）**

  另一个配套的小文件，里面是一串**无符号 8 位整数（0–255）**。每个数表示容器文件中某条记录被“多少个地方在用”。有了它，就能实现快照/分叉、去重和安全回收——当计数到 0，说明这条记录没人用了，可以回收。

- **Sector（扇区）**

  面向**虚拟磁盘对外呈现**的最小读写单位。FVD v1 里固定 **512 字节**。

> 你可以把它理解成“来访客人的切蛋糕粒度”。

- **Record（记录）**

  面向**容器文件内部存储**的最小单位。在 FVD v1 里同样是 **512 字节**。

> 这是“厨房里装盘的粒度”。外部说“扇区”，内部说“记录”，大小一样但语境不同，别混淆。

- **Disk Geometry（磁盘几何）**

  早期磁盘的 CHS（柱面/磁头/每道扇区）表述方式。总扇区数 = **柱面数 × 磁头数 × 每道扇区数**。现代常用 LBA，但规范里仍用这个术语描述布局。

- **Refcount（引用计数）**

  某个**数据块（记录）**当前被多少实体使用的计数。

- **Reserved（保留字段）**

预留给将来用的字段。**不要写入**（将来版本可能赋予含义），读到的值也**没有实际意义**，可能是任意内容。

重要约定（Note）

- **字节序**：除非另行说明，文件里的数值都用**网络字节序（大端，big-endian）**存放——高位字节在前。

> 做解析/写入时一定按大端解释，否则数会错。

- **数值表示**：规范里的数字默认**十进制**；若以 `0x` 开头表示**十六进制**（例如 `0x10`）。

FVD 文件长什么样?

- 一个完整的 **FVD 镜像 = 1 个容器文件 + 1 个引用计数文件。**两者合起来才叫一个“FVD image”。

- **容器文件**通常扩展名是 `.fvd`（也可以不用这个扩展名，甚至无扩展名）。

- **引用计数字段文件**的命名规则：**“容器文件的完整路径 + `.ref`”。**

- 例：`/images/disk.fvd` → 引用计数文件是 `/images/disk.fvd.ref`。
- 如果容器叫 `/images/base`（无扩展名），则配套文件是 `/images/base.ref`。
- 通常与容器文件放在**同一路径**，方便一起管理。

小结 & 心智模型

- 对外，虚拟磁盘按**扇区（512B）**读写；对内，容器文件按**记录（512B）**存放。
- 引用计数文件是一串 8 位数，**（通常）与容器里的记录一一对应**，记录被多少快照/分叉共享，这个数字就是多少。
- 解析文件时请记住两点：**大端字节序、0x 是十六进制。**

- 看到 **Reserved** 就当它“占坑”，不要写、不要依赖其值。

如果你愿意继续，我可以接着讲下一页：记录与引用计数如何一一对应、读写流程是怎样的、以及快照/分叉时会发生什么。

第 3 页

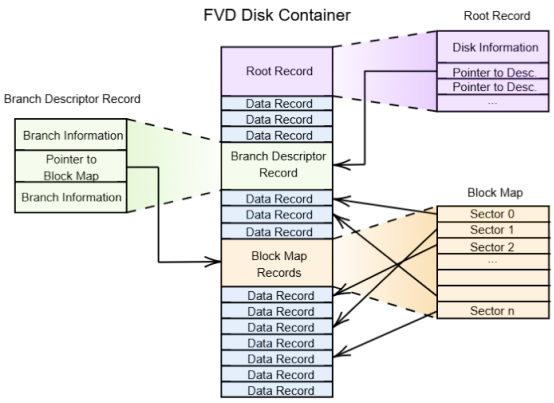
- FVD image: `comp3301.fvd`
  - Disk container: `comp3301.fvd`
  - Refcount metadata: `comp3301.fvd.ref`
- FVD image: `backup`
  - Disk container: `backup`
  - Refcount metadata: `backup.ref`

FVD Disk Container Layout

An FVD disk container file consists of a series of records, where each record has a fixed length of 512 bytes. There are four types of records:

- Root Record
  - The first record of an FVD disk container file, containing information about the virtual disk. There is only one root record per FVD image.
- Branch Descriptor Record
  - There is one branch descriptor record for each branch in the FVD image, containing information about that particular branch.
- Block Map Record
  - There is one Block Map per branch in the FVD image, consisting of a fixed number of Block Map Records stored contiguously.
- Data Record
  - Records for storing disk sector data, not guaranteed to be contiguous and may appear at any location. Each Data Record stores a single sector.

Together, these records form an FVD disk container file:



(Diagram Not Drawn To Scale)

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

下面把这页的要点，用**入门友好**的方式分点讲清楚。

先看文件命名示例

- 一个 **FVD 镜像**由两部分组成：

1. **磁盘容器文件**（装数据）
2. **引用计数元数据文件**（装每条数据被多少分支在用）

- 命名规则：**容器文件名 +** `.ref` 就是配套的引用计数文件。

- 例：`comp3301.fvd` ↔ `comp3301.fvd.ref`
- 例：`backup` ↔ `backup.ref`

容器文件（Disk Container）内部长什么样

容器文件是由一串**固定大小为 512 字节的记录（record）**组成。只有 4 种记录类型：

1. **Root Record（根记录）**

- **第 1 条记录**，全盘唯一。
- 放虚拟盘的总体信息，并且**给出"指针"**（位置）去找其它重要结构（分支、块映射等）。

2. **Branch Descriptor Record（分支描述符记录）**

- **每个分支 1 条。**
- 记录这个分支的基本信息，并**指向该分支的块映射（Block Map）。**
- "分支"可理解为从同一基线镜像"分叉"的版本/快照。

3. **Block Map Record（块映射记录）**

- **每个分支有一份 Block Map**，由**若干条连续存放**的 Block Map 记录构成。
- 作用：把**扇区号 → 数据记录的位置**对应起来，是查找数据的"目录表"。

4. **Data Record（数据记录）**

- 真正放数据的记录，每条记录**只存 1 个扇区（512B）**。
- 这些记录**可以分散在文件的任何位置**，不保证连续。

> 把它想成一本书：
>
> **Root**=总目录；**Branch Descriptor**=每个版本的分卷说明；
>
> **Block Map**=该版本的详细页码索引；**Data Record**=具体内容页。

读一个扇区时会怎么走（直觉版）

1. 选择你要访问的**分支**；
2. 从该分支的 **Branch Descriptor** 找到它的 **Block Map**；
3. 在 **Block Map** 里用“扇区号”查到对应的 **Data Record** 位置；
4. 去容器文件把那条 512B 的 **Data Record** 读出来。

为什么要有“分支”和引用计数（连接前文）

- 多个分支可以**共享同一条 Data Record**；谁在用，这个数量写在配套的 `.ref` 文件里。
- 这样做就能实现**快照/克隆**：改动时只为该分支写新记录并更新映射与计数，未改动的数据继续共享，省空间又高效。

图里要抓的关键信息

- **Root Record 在最前面且唯一**；
- **每个分支都有 1 个 Branch Descriptor + 1 个 Block Map（由多条记录组成）**；
- **Data Records 散布其间**，Block Map 把“扇区号”指到这些 Data Records。

想继续深入的话，我可以接着讲**每种记录的字段**都有哪些、Block Map 的索引格式长什么样，以及“写入/快照/回收”的具体流程。

第 4 页

Root Record

A Root Record has the following structure:

Offset	Name	Meaning	Type	Size	Value
0	`MAGIC`	Magic	`uint32_t`	4	`0x46564449`
4	`VMAJ`	Version (Major)	`uint8_t`	1	`1`
5	`VMIN`	Version (Minor)	`uint8_t`	1	`0`
6	`NBRCHS`	No. Branches	`uint16_t`	2	`1` – `122`
8	`NRECS`	No. Records	`uint32_t`	4	⩾ `3`
12	`NSECTS`	No. Sectors	`uint32_t`	4	⩾ `1`
16	`NCYLS`	No. Cylinders	`uint32_t`	4	`1` – `65536`
20	`NHEADS`	No. Heads	`uint16_t`	2	`1` – `16`
22	`NSPT`	No. Sectors Per Track	`uint16_t`	2	`1` – `255`
24	`BRCHS[122]`	Global Branch Index	`uint32_t[122]`	488	Rec. Number

The `MAGIC` field must be `0x46564449` in order for a file to be recognised as an FVD disk container file. The `VMAJ` and `VMIN` fields must be `1` and `0` respectively for FVD version 1. The `NBRCHS` field contains the total number of branches within the FVD image, which must be a number between `1` and `122`. The `NRECS` field contains the number of records within the FVD disk container file. The `NSECTS` field contains the number of sectors within the virtual disk, which is the product of `NCYLS`, `NHEADS` and `NSPT`. `NCYLS`, `NHEADS` and `NSPT` collectively describe the disk geometry in CHS notation, and should be within the limits imposed by the ATA interface (at most 65536 cylinders, 16 heads and 255 sectors).

The `BRCHS` array contains a list of record numbers, each pointing to a Branch Descriptor Record. Only the first `NBRCHS` elements of the array are populated, with `BRCHS[n]` pointing to the Branch Descriptor Record for the n^{th} branch. The first element of the `BRCHS` array, `BRCHS[0]`, is the **default branch**.

Branch Descriptor Record

A Branch Descriptor Record has the following structure:

Offset	Name	Meaning	Type	Size	Value
0	`MAGIC`	Magic	`uint32_t`	4	`0x46564449`
4	`NCHILDS`	No. Child Branches	`uint16_t`	2	`0` – `16`
6	`CTIME`	Creation Time	`uint64_t`	8	Unix Timestamp
14	`BLKMAP`	Block Map Location	`uint32_t`	4	Rec. Number
18	`PARENT`	Parent Branch Descriptor	`uint32_t`	4	Rec. Number
22	`CHILDS[16]`	Child Branch Descriptors	`uint32_t[16]`	64	Rec. Number
86	`NAME`	Branch Name	`char[32]`	32	`NUL`-Term. String
118	`RESERVED`	Reserved Field	N/A	394	N/A

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

这页主要把 **两种关键记录** 的结构讲清楚：**Root Record（根记录）** 和 **Branch Descriptor Record（分支描述符记录）**。每条记录固定 **512 字节**，字段都按**大端序（big-endian）**存放，表中的 **Offset** 是“从记录开头算起的字节偏移”。

1) Root Record（根记录）

- **位置/作用**：容器文件里的**第 1 条记录**，只有一条。它像“总目录”，提供整盘信息并指向各个分支。
- **字段逐条理解**（括号里是大小/取值范围）：

- **MAGIC** (4B)：必须是 `0x46564449`，文件才被认作 FVD 容器（魔数，用来校验格式）。
- **VMAJ / VMIN** (1B/1B)：版本号，FVD v1 要求 **1** 和 **0**。
- **NBRCHS** (2B)：**分支总数**，范围 **1–122**。
- **NRECS** (4B)：容器文件里**记录（record）总数**，≥ **3**。
- **NSECTS** (4B)：**虚拟磁盘的总扇区数**（每扇区 512B），≥ **1**。
- **NCYLS / NHEADS / NSPT** (4B/2B/2B)：磁盘“几何参数”（柱面/磁头/每道扇区），分别限制 **≤ 65536 / ≤ 16 / ≤ 255**。它们的乘积应当等于 **NSECTS**。
- **BRCHS[122]** (488B)：一个**数组**，每个元素是“**记录号**”，指向一个 **Branch Descriptor Record**。只有前 **NBRCHS** 个元素有效；**BRCHS[0]** 对应**默认分支**。
- **你可以怎样用它来做基本校验**

1. 读首个 512B → 检查 **MAGIC/版本**；
2. 检查 `NRECS * 512` 是否不大于容器文件大小；
3. 验证 `NCYLS * NHEADS * NSPT == NSECTS`；
4. 枚举 `i = 0..NBRCHS-1` 的 **BRCHS[i]**，它们应是 `< NRECS` 的合法记录号。

> “记录号（Record Number）”可以理解为：把容器文件按 512 字节一段切开后，从头数到该段的**编号**。用它来“跳转”到别的记录。

---

2) Branch Descriptor Record（分支描述符记录）

- **位置/作用**：**每个分支 1 条**，描述该分支，并告诉你它的 **Block Map** 在哪、父子关系如何。
- **字段逐条理解**：

- **MAGIC** (4B)：同样是 `0x46564449`（校验用）。
- **NCHILDS** (2B)：**子分支数量**，范围 **0–16**。
- **CTIME** (8B)：**创建时间**（Unix 时间戳，秒）。
- **BLKMAP** (4B)：**块映射记录的记录号**。通过它能找到该分支的 Block Map（用来把“扇区号 → 数据记录号”对应起来）。
- **PARENT** (4B)：**父分支的分支描述符记录号**（建立分支树）。
- **CHILDS[16]** (64B)：**子分支的记录号列表**，只有前 **NCHILDS** 个有效。
- **NAME** (32B)：**分支名**，以 **NUL 结尾的字符串**（不足会用 `\0` 补齐）。
- **RESERVED** (394B)：**保留**，别写入，读到也不代表任何含义。
- **用途直觉**

- 通过 **PARENT/CHILDS** 能把所有分支串成一棵树；
- 通过 **BLKMAP** 能定位到这个分支的**块映射**，再由块映射找到实际的数据记录（Data Record）。

---

3) 结合两者，读取数据的大致流程

1. 从 **Root Record** 取到默认或指定分支的记录号（`BRCHS[i]`）。
2. 打开该分支的 **Branch Descriptor Record**，得到 **BLKMAP** 的记录号。
3. 在 **Block Map** 里用"扇区号"查对应的**数据记录号**。
4. 跳到那个 **Data Record**（512B）读取数据。

---

4) 小提示与易错点

- **大端序**：解析所有整数时记得按 big-endian。
- **字段对齐**：表里的 **Offset** 就是字节位置；总大小严格凑满 512B（这也是为什么根记录里会有 488B 的 `BRCHS[122]`、分支记录里有 394B 的 `RESERVED`）。
- **默认分支**：通常用 **BRCHS[0]**；其余分支按 `BRCHS[1..NBRCHS-1]`。
- **一致性检查**：`BRCHS`、`BLKMAP`、`PARENT/CHILDS` 指向的记录号都应在 `[0, NRECS)` 内。

如果你愿意继续，我可以把 **Block Map** 和 **Data Record** 的格式也用同样方式细化，并画出一次"写入（含写时复制）/创建快照/回收"的完整流程图解。

第 5 页

The `MAGIC` field must be `0x42524348` in order for a record to be recognised as a Branch Descriptor Record. The `NCHILDS` field holds the number of child branches this branch has, which is a number from `0` to `16`. The `CTIME` field holds a Unix timestamp describing when the branch was created (forked from parent). The `BLKMAP` field holds a record number pointing to the starting record of the block map for this branch. The `PARENT` field holds a record number pointing to the Branch Descriptor Record of its parent branch, or `0` if the current branch is the default branch.

The `CHILDS` array is an array of record numbers, each pointing to the Branch Descriptor Record of a child branch. Only the first `NCHILDS` elements of the `CHILDS` array are populated. The `NAME` field is a `NUL`-terminated string holding the branch name, storing up to 31 characters. The default branch always has name `default`, and each branch within an FVD image must have a unique name.

Block Map

There is one Block Map for each branch of an FVD image. The Block Map maps sectors of the virtual disk to data records, similar to indexed allocation used in filesystems (covered in week 9 lecture). Each Block Map consists of a fixed number of consecutive records called Block Map Record, stored in the disk container file.

At a high level, the Block Map can be seen as a consecutive array of record numbers (`uint32_t`), with the array having the same number of elements as the number of sectors in the virtual disk. This allows the record number of sector n to be retrieved through a simple lookup: RecordNumber(n) = Block Map[n].

The number of entries in each Block Map Record is as follows:

$$\mathrm{N}_{\mathrm{Entries}} = \left\lfloor \frac{\text{FVD Record Size}}{\text{Size of Each Entry}} \right\rfloor$$

The number of Block Map Records per Block Map is calculated through the following formula:

$$\mathrm{N}_{\mathrm{Records}} = \left\lceil \frac{\text{No. Virtual Disk Sectors}}{\mathrm{N}_{\mathrm{Entries}}} \right\rceil$$

The location of the map entry for sector S within the Block Map can be obtained using:

$$\begin{aligned} \mathrm{BlockMapRecord}_S &= \text{Block Map Location} + \left\lfloor \frac{S}{\mathrm{N}_{\mathrm{Entries}}} \right\rfloor \\ \mathrm{IndexWithinRecord}_S &= S \bmod \mathrm{N}_{\mathrm{Entries}} \end{aligned}$$

To facilitate with the on-demand space allocation nature of FVD, if a virtual disk sector had never been written to before, it is assumed to contain all binary 0s. For such sectors, they are not physically mapped to any data record but instead use the special record number of `0` in the Block Map to indicate that they are not allocated.

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

好，这页主要补充了**分支描述符记录（Branch Descriptor Record）**的细节，并系统讲清了 **Block Map（块映射）** 怎么工作。给你用入门者能直接上手的方式拆解如下：

一、分支描述符记录的关键点（Branch Descriptor Record）

> 这是“某个分支/快照”的身份证 + 导航指针。

- **MAGIC 校验**

- 必须是 `0x42524348`（ASCII 正好是 **“BRCH”**）。
- 作用：让解析器确认这条 512B 的记录确实是“分支描述符”。
- **注意**：如果你在上一页的表格里看到别的取值，那以**本页说明为准**——分支描述符的魔数应为 `0x42524348`。

- **NCHILDS（子分支数量）**：0–16。表示从当前分支直接“长出来”的下一级分支有几个。

- **CTIME（创建时间）**：Unix 时间戳（单位秒），代表该分支被创建/从父分支分叉的时间。

- **BLKMAP（块映射起始记录号）**：指向本分支的 **Block Map** 在容器文件中的起始“记录号”。

> 有了它，就能找到“扇区号 → 数据记录号”的索引表。

- **PARENT（父分支描述符记录号）**：指向**父分支**的描述符记录；如果这是**默认分支**，则为 **0**。

- **CHILDS[16]（子分支列表）**：每个元素是一个**记录号**，指向某个**子分支**的分支描述符。只有前 **NCHILDS** 个有效。

- **NAME（分支名）**：NUL 结尾字符串，最多 31 个字符。

- 约定：**默认分支的名字固定叫** `default`。
- 约束：**同一个 FVD 镜像内，所有分支名必须唯一。**

二、Block Map（块映射）到底是什么?

> 它是把**虚拟磁盘的扇区号**映射到**数据记录号**的“索引表”。每个**分支**都有自己的 Block Map。

- **由哪些记录组成**

- Block Map 本身由若干条**连续存放**的“**Block Map Record**”组成；每条记录固定 512B。

- **逻辑视角**

- 可以把 Block Map 看成一个很长的数组：

```
* **元素类型**：`uint32_t`（4 字节的无符号整数），表示**记录号**。

* **数组长度**：等于**虚拟磁盘的总扇区数**。
```

- 因此要找第 `n` 个扇区的数据记录号，只需：

```
```

RecordNumber(n) = BlockMap[n]

```
```

- **每条 Block Map 记录能放多少条映射?**

- 公式：

```
```

N_entries = FVD_Record_Size / Size_of_Each_Entry

          = 512 / 4

          = 128

```
```

```
即：**每条 Block Map 记录能放 128 个映射项**。
```

- **一个分支需要多少条 Block Map 记录?**

- 设虚拟磁盘共有 `NoSectors` 个扇区：

```
N_records = ceil( NoSectors / N_entries )

          = ceil( NoSectors / 128 )
```

- **给定扇区 S（从 0 开始），它对应的映射项在哪?**

- 先找到它落在哪一条 Block Map 记录里：

```
BlockMapRecord_S = BlockMapLocation + floor( S / N_entries )

                 = BlockMapLocation + floor( S / 128 )
```

其中 `BlockMapLocation` 就是分支描述符里的 **BLKMAP**（起始记录号）。

- 再算这条记录中的**索引位置**：

```
IndexWithinRecord = S mod N_entries

                  = S mod 128
```

- **按需分配 & “洞” 的表示**

- FVD 支持**按需分配**：没写过的扇区默认视为“全 0”。
- 这种“从未写入”的扇区在 Block Map 里**不会映射到真正的数据记录**，而是使用一个**特殊的记录号** `0` 来表示“**未分配**”。

- 读取时如果看到映射值是 `0`，就按**全 0** 返回；写入时才会**分配新的 Data Record** 并更新映射。

三、一步到位的直观例子

- **条件**：虚拟盘有 **1,000,000** 个扇区。
- **计算**：

- `N_entries = 128`
- `N_records = ceil(1,000,000 / 128) = 7,813` 条 Block Map 记录（连续存放）。
- **查扇区 S=10,000 的映射**：

- `BlockMapRecord_S = BLKMAP + floor(10000/128) = BLKMAP + 78`
- `IndexWithinRecord = 10000 mod 128 = 16`
- 于是到第 `BLKMAP+78` 条记录里取第 16 项即可得到**数据记录号**；为 `0` 则表示该扇区未分配（读作全 0）。

四、你可以据此实现的三个功能

1. **解析 & 校验**：检查 BLKMAP 指向的连续记录数量是否满足 `N_records`；随机抽查若干映射项是否 < `NRECS`。
2. **按需读**：遇到映射值为 `0`，直接构造 512B 的全零数据返回。
3. **按需写（写时分配）**：第一次写一个未分配扇区时，分配新的 Data Record、写入数据，并更新相应的 Block Map 项。

如果你接着发下一页，我可以把 **Data Record 的布局**、**引用计数文件如何与 Data Record 对应**、以及**写入/快照/回收**的完整流程图再分步骤讲清楚。

第 6 页

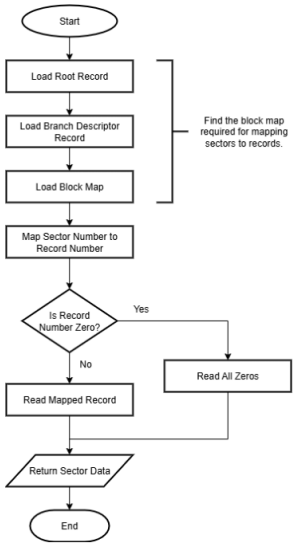
Refcount Metadata File

The refcount metadata file is a file composed of a series of unsinged 8-bit integers (`uint8_t`), with each holding the number of references the corresponding record in the disk container file has. The first 8-bit unsigned integer holds the refcount of the first record, and so on. The size of the refcount metadata file should be the same as the number of records in the disk container file.

The Root Record, all Branch Descriptor Records and all Block Map Records should have refcount of 1. Data Records may have refcounts greater than one if they are referenced by more than one branch and require copy-on-write. A record is unused if the refcount is 0, and data stored within is undefined and may be deleted or overwritten at any time.

Reading Sectors

To read a sector from a particular branch:



1. Use the Root Record to locate the Branch Descriptor Record
2. Use the Branch Descriptor Record to locate the Block Map
3. Load the Block Map, or at least the Block Map Record which contains the entry for the requested sector
4. Use the Block Map to map the sector number to record number
5. Check if record number is zero:
    - Yes - the sector is unallocated, read all zeros
    - No – the sector is allocated, read the record pointed to by the record number
6. Return the sector data

Writing Sectors

Writing a sector is more involved than simply reading a sector, as it could involve sector allocation and copy-on-write operations:

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

好的，这页主要讲三件事：**引用计数文件（.ref）**是什么；**读一个扇区时的流程**；以及**写入扇区会更复杂（铺垫到下一页）**。我用入门者视角分点解释：

---

1) Refcount Metadata File（引用计数元数据文件）

把它想成与容器文件（.fvd）**一一对应**的“小本子”：

- **内容与大小**

- 由一串 **无符号 8 位整数（uint8_t）** 组成。
- **第 1 个字节**记录“**容器第 0 号记录**”的引用计数；第 2 个字节对应第 1 号记录；依次类推。
- 因为容器里每条记录固定 512B、且有 `NRECS` 条，所以 **.ref 文件的字节数 = NRECS。**

- **各类记录的典型计数**

- **Root Record / 所有 Branch Descriptor / 所有 Block Map 记录**：**计数应为 1**（被结构本身使用）。
- **Data Record（数据记录）**：**可能大于 1**——当多个分支共享同一数据块时，就会>1；这也正是快照/分叉节省空间的基础。

- **计数的含义**

- **=0**：该记录“**未被使用**”。它里面的内容**没有定义**，你可以在需要时**覆盖或删除**它。
- **>1**：表示被多个分支引用；若某个分支要在这块上**写入**，需要做**写时复制（Copy-on-Write）**：新分配一条记录写新数据，同时更新这个分支的映射，并相应调整两条记录的引用计数。

---

2) Reading Sectors（读取某个分支的一个扇区）

文字步骤 + 左侧流程图表达的是同一件事，核心逻辑如下：

1. **定位分支**

- 先读 **Root Record**，从 `BRCHS[i]` 拿到你要访问的那个**分支描述符**（Branch Descriptor）的**记录号。**

2. **找到 Block Map**

- 读取该分支的 **Branch Descriptor**，拿到 **BLKMAP**（该分支 **Block Map** 的起始记录号）。

3. **加载 Block Map（或至少相关那条 Block Map 记录）**

- 每条 Block Map 记录能装 128 个“扇区→数据记录号”的条目。
- 根据扇区号 **S** 计算它在哪条 Block Map 记录、以及在那条记录里的第几个位置（上一页给了公式：`record = BLKMAP + floor(S/128)`，`index = S mod 128`）。

4. **映射扇区号 → 记录号**

- 取出该条目的 **记录号**（`uint32`）。

5. **判断是否未分配**

- 如果记录号 **= 0**：说明这个扇区**从未写过**，按 FVD 规则它等同于**全 0**；直接返回 **512B 的 0。**
- 如果记录号 **≠ 0**：到容器文件里读取对应的 **Data Record（512B）**。

6. **把扇区数据返回。**

> 心智模型：**Root → Branch Descriptor → Block Map → Data Record**，中途若看到映射项为 0，就直接“读 0”。

---

3) Writing Sectors（写入扇区）的铺垫

- 文末提醒：写入比读取复杂，因为会涉及：

- **按需分配**：原来是 0（未分配）的扇区，第一次写要**找一条空闲记录**来存数据，并把 Block Map 指向它，同时把这条记录在 **.ref** 里置为 **1。**
- **写时复制（COW）**：若多个分支共享同一数据记录（.ref 计数>1），当前分支写入不能直接改旧记录——要**新分配一条记录**写新数据，**旧记录计数减 1**、**新记录计数设为 1**，并更新当前分支的 Block Map 映射。
- 这些具体步骤会在**下一页**展开。

小例子（把三个概念串起来）

- 你在分支 `featureA` 读取扇区 1234：

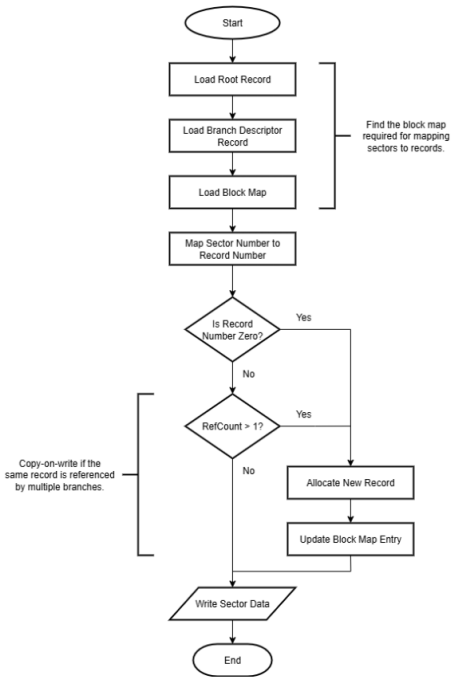
1. Root 找到 `featureA` 的 Branch Descriptor；
2. Branch Descriptor 给出 `BLKMAP=200`；
3. `1234/128=9 余 82` → 去第 `200+9=209` 号 Block Map 记录、取第 82 项；
4. 若该项值是 `0` → 返回 512B 全 0；若是 `7777` → 读第 7777 号 **Data Record**。
5. 假如 `.ref[7777]` 是 3，说明这条数据同时被 3 个分支共享；如果你随后**写入**这个扇区，就会触发 **COW**。

常见易错点

- **别忘记大端序**解析整数（魔数、记录号、时间戳等全是 big-endian）。
- **.ref 的长度一定等于容器记录总数**；索引方式是"**记录号 == .ref 下标**"。
- **未分配 ≠ 有一条全零的数据记录**：未分配是**映射项=0**的语义，读时返回 0，写时才真正分配记录。

如果你继续发下一页，我就把**写入流程（含分配与 COW）**按同样方式一步步拆给你。

第 7 页



1. Use the Root Record to locate the Branch Descriptor Record
2. Use the Branch Descriptor Record to locate the Block Map
3. Load the Block Map, or at least the Block Map Record which contains the entry for the requested sector
4. Use the Block Map to map the sector number to record number
5. Check if record number is zero:
    - Yes - the sector is unallocated, allocate it and update Block Map
    - No – do nothing as the sector is already allocated
6. Check if the refcount of the record is greater than 1:
    - Yes – perform copy-on-write, that is, allocate a new record and update Block Map
    - No – do nothing as there is nothing else using that record
7. Write the data

Hint

The above flowchart and steps only outline the major steps needed to write a sector, and there are minor steps which have been left out intentionally. To score the higher marks, you must ensure that the FVD image after writing is valid and consistent.

Changelog

Date	Version	Description
2025/10/04	1.0	Forkable Virtual Disk Specification 1.0

提问： 这张截图里的内容是什么意思？请面向初学者详细解释，分点讲清楚。

好的，这页主要讲三件事：**引用计数文件（.ref）**是什么；**读一个扇区时的流程**；以及**写入扇区会更复杂（铺垫到下一页）**。我用入门者视角分点解释：

---

1) Refcount Metadata File（引用计数元数据文件）

把它想成与容器文件（.fvd）**一一对应**的“小本子”：

- **内容与大小**

- 由一串 **无符号 8 位整数（uint8_t）** 组成。
- **第 1 个字节**记录“**容器第 0 号记录**”的引用计数；第 2 个字节对应第 1 号记录；依次类推。
- 因为容器里每条记录固定 512B、且有 `NRECS` 条，所以 **.ref 文件的字节数 = NRECS。**

- **各类记录的典型计数**

- **Root Record / 所有 Branch Descriptor / 所有 Block Map 记录**：**计数应为 1**（被结构本身使用）。
- **Data Record（数据记录）**：**可能大于 1**——当多个分支共享同一数据块时，就会>1；这也正是快照/分叉节省空间的基础。

- **计数的含义**

- **=0**：该记录“**未被使用**”。它里面的内容**没有定义**，你可以在需要时**覆盖或删除**它。
- **>1**：表示被多个分支引用；若某个分支要在这块上**写入**，需要做**写时复制（Copy-on-Write）**：新分配一条记录写新数据，同时更新这个分支的映射，并相应调整两条记录的引用计数。

---

2) Reading Sectors（读取某个分支的一个扇区）

文字步骤 + 左侧流程图表达的是同一件事，核心逻辑如下：

1. **定位分支**

- 先读 **Root Record**，从 `BRCHS[i]` 拿到你要访问的那个**分支描述符**（Branch Descriptor）的**记录号。**

2. **找到 Block Map**

- 读取该分支的 **Branch Descriptor**，拿到 **BLKMAP**（该分支 **Block Map** 的起始记录号）。

3. **加载 Block Map（或至少相关那条 Block Map 记录）**

- 每条 Block Map 记录能装 128 个“扇区→数据记录号”的条目。
- 根据扇区号 **S** 计算它在哪条 Block Map 记录、以及在那条记录里的第几个位置（上一页给了公式：`record = BLKMAP + floor(S/128)`，`index = S mod 128`）。

4. **映射扇区号 → 记录号**

- 取出该条目的 **记录号**（`uint32`）。

5. **判断是否未分配**

- 如果记录号 **= 0**：说明这个扇区**从未写过**，按 FVD 规则它等同于**全 0**；直接返回 **512B 的 0。**
- 如果记录号 **≠ 0**：到容器文件里读取对应的 **Data Record（512B）**。

6. **把扇区数据返回。**

> 心智模型：**Root → Branch Descriptor → Block Map → Data Record**，中途若看到映射项为 0，就直接“读 0”。

---

3) Writing Sectors（写入扇区）的铺垫

- 文末提醒：写入比读取复杂，因为会涉及：

- **按需分配**：原来是 0（未分配）的扇区，第一次写要**找一条空闲记录**来存数据，并把 Block Map 指向它，同时把这条记录在 **.ref** 里置为 **1。**
- **写时复制（COW）**：若多个分支共享同一数据记录（.ref 计数>1），当前分支写入不能直接改旧记录——要**新分配一条记录**写新数据，**旧记录计数减 1**、**新记录计数设为 1**，并更新当前分支的 Block Map 映射。
- 这些具体步骤会在**下一页**展开。

小例子（把三个概念串起来）

- 你在分支 `featureA` 读取扇区 1234：

1. Root 找到 `featureA` 的 Branch Descriptor；
2. Branch Descriptor 给出 `BLKMAP=200`；
3. `1234/128=9 余 82` → 去第 `200+9=209` 号 Block Map 记录、取第 82 项；
4. 若该项值是 `0` → 返回 512B 全 0；若是 `7777` → 读第 7777 号 **Data Record**。
5. 假如 `.ref[7777]` 是 3，说明这条数据同时被 3 个分支共享；如果你随后**写入**这个扇区，就会触发 **COW**。

常见易错点

- **别忘记大端序**解析整数（魔数、记录号、时间戳等全是 big-endian）。
- **.ref 的长度一定等于容器记录总数**；索引方式是"**记录号 == .ref 下标**"。
- **未分配 ≠ 有一条全零的数据记录**：未分配是**映射项=0**的语义，读时返回 0，写时才真正分配记录。

如果你继续发下一页，我就把**写入流程（含分配与 COW）**按同样方式一步步拆给你。