

内部碎片与小文件优化

上篇「系统中的大多数文件有多大？」提到，文件系统中大部分文件其实都很小，中位数一直稳定在 4K 左右，而且这个数字并没有随着存储设备容量的增加而增大。但是存储设备的总体容量实际是在逐年增长的，总容量增加而文件大小中位数不变的原因，可能是以下两种情况：

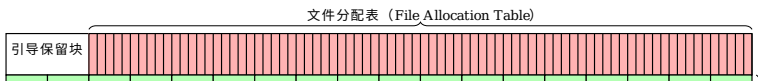
1. 文件数量在增加
2. 大文件的大小在增加

实际上可能是这两者综合的结果。这种趋势给文件系统的设计带来了越来越多的挑战，因为我们不能单纯根据平均文件大小来增加块大小（block size）优化文件读写。微软的文件系统（FAT系和 NTFS）使用「簇（cluster）」这个概念管理文件系统的可用空间分配，在 Unix 系文件系统中也有类似的块（block）的概念，只不过称呼不一样。现代文件系统都有这个块大小或者簇大小的概念，从而基本的文件空间分配可以独立于硬件设备本身的扇区大小。块大小越大，单次分配空间越大，文件系统所需维护的元数据越小，复杂度越低，实现起来也越容易。而块大小越小，越能节约可用空间，避免内部碎片造成的浪费，但是跟踪空间所需的元数据也越复杂。

具体块/簇大小对文件系统设计带来什么样的挑战？我们先来看一下（目前还在用的）最简单的文件系统怎么存文件的吧：

FAT系文件系统与簇大小

在 FAT 系文件系统(FAT12/16/32/exFAT)中，整个存储空间除了一些保留扇区之外，被分为两大块区域，看起来类似这样：



前一部分区域放文件分配表（File Allocation Table），后一部分是实际存储文件和目录的数据区。数据区被划分成「簇（cluster）」，每个簇是一到多个连续扇区，然后文件分配表中表项的数量 决定了后面可用空间的簇的数量。文件分配表（FAT）在 FAT 系文件系统中这里充当了两个重要作用：

- 1. 管理簇空间分配。空间分配器可以扫描 FAT 判断哪些簇处于空闲状态，那些簇已经被占用，从而分配空间。
- 2. 对现有文件，FAT 表中的记录形成一个单链表结构，用来寻找文件的所有已分配簇地址。

目录结构		
文件名. 扩展名	文件属性	起始簇
文件名. 扩展名	文件属性	起始簇
文件名. 扩展名	文件属性	起始簇
文件名. 扩展名	文件属性	起始簇

直观上理解，FAT表像是数据区域的缩略图，数据区域有多少簇，FAT表就有多少表项。FAT系文件系统中每个簇有多大，由文件系统总容量，以及FAT表项的数量限制。我们来看一下微软文件系统默认格式化的簇大小（数据来源）：

Volume Size	FAT16	FAT32	exFAT	NTFS
< 8 MiB	N/A	N/A	4KiB	4KiB
8 MiB – 16 MiB	512B	N/A	4KiB	4KiB
16 MiB – 32 MiB	512B	512B	4KiB	4KiB
32 MiB – 64 MiB	1KiB	512B	4KiB	4KiB
64 MiB – 128 MiB	2KiB	1KiB	4KiB	4KiB
128 MiB – 256 MiB	4KiB	2KiB	4KiB	4KiB
256 MiB – 512 MiB	8KiB	4KiB	32KiB	4KiB
512 MiB – 1 GiB	16KiB	4KiB	32KiB	4KiB
1 GiB – 2 GiB	32KiB	4KiB	32KiB	4KiB
2 GiB – 4 GiB	64KiB	4KiB	32KiB	4KiB
4 GiB – 8 GiB	N/A	4KiB	32KiB	4KiB
8 GiB – 16 GiB	N/A	8KiB	32KiB	4KiB
16 GiB – 32 GiB	N/A	16KiB	32KiB	4KiB
32 GiB – 16TiB	N/A	N/A	128KiB	4KiB
16 TiB – 32 TiB	N/A	N/A	128KiB	8KiB
32 TiB – 64 TiB	N/A	N/A	128KiB	16KiB
64 TiB – 128 TiB	N/A	N/A	128KiB	32KiB
128 TiB – 256 TiB	N/A	N/A	128KiB	64KiB

> 256 TiB N/A N/A N/A N/A

用于软盘的时候 FAT12 的簇大小直接等于扇区大小 512B，在容量较小的 FAT16 上也是如此。FAT12 和 FAT16 都被 FAT 表项的最大数量限制（分别是 4068 和 65460），FAT 表本身不会太大。所以上表中可见，随着设备容量增加，FAT16 需要增加每簇大小，保持同样数量的 FAT 表项。

到 FAT32 和 exFAT 的年代，FAT 表项存储 32bit 的簇指针，最多能有接近 4G 的 FAT 表项，从而表项数量理应不再限制 FAT 表大小，从而理应使用同样的簇大小。不过事实上，簇大小仍然根据设备容量增长而增大。FAT32 上 256MiB 到 8GiB 的范围内使用 4KiB 簇大小，随后簇大小开始增加；在 exFAT 上 256MiB 到 32GiB 使用 32KiB 簇大小，随后增加到 128KiB。增加簇大小的原因是为了限制 FAT 表整体的大小，因为在使用 FAT 表的文件系统中，需要将 FAT 表整体装入内存才能满足文件访问和簇分配时的性能，如果读写 FAT 表的范围需要访问磁盘，那么整个文件系统的读写性能将暴跌到几近不可用。到针对闪存优化的 exFAT 上，虽然在 FAT 表外还有额外簇分配位图，但是也同样要限制 FAT 表整体大小，减少对 FAT 表区域的随机读写。

使用如此大的簇大小，导致的劣势在于极度浪费存储空间。

