內部碎片與小文件優化

上篇「系統中的大多數文件有多大？」提到，文件系統中大部分文件其實都很小，中位數一直穩定在 4K 左右，而且這個數字並沒有隨着存儲設備容量的增加而增大。但是存儲設備的總體容量實際是在逐年增長的，，總容量增加而文件大小中位數不變的原因，可能是以下兩種情況：

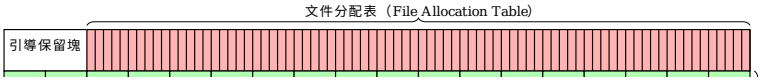
1. 文件數量在增加
2. 大文件的大小在增加

實際上可能是這兩者綜合的結果。這種趨勢給文件系統設計帶來了越來越多的挑戰， 因爲我們不能單純根據平均文件大小來增加塊大小（block size）優化文件讀寫。 微軟的文件系統（FAT系和 NTFS）使用「簇（cluster）」這個概念管理文件系統的可用空間分配，在 Unix 系文件系統中有類似的塊（block）的概念，只不過稱呼不一樣。 現代文件系統都有這個塊大小或者簇大小的概念，從而基本的文件空間分配可以獨立於硬件設備本身的扇區大小。 塊大小越大，單次分配空間越大，文件系統所需維護的元數據越小，複雜度越低，實現起來也越容易。 而塊大小越小，越能節約可用空間，避免內部碎片造成的浪費，但是跟蹤空間所需的元數據也越複雜。

具體塊/簇大小對文件系統設計帶來什麼樣的挑戰？我們先來看一下（目前還在用的）最簡單的文件系統怎麼存文件的吧：

FAT系文件系統與簇大小

在 FAT 系文件系統(FAT12/16/32/exFAT)中，整個存儲空間除了一些保留扇區之外，被分爲兩大塊區域，看起來類似這樣：



前一部分區域放文件分配表（File Allocation Table），後一部分是實際存儲文件和目錄的數據區。 數據區被劃分成「簇（cluster）」，每個簇是一到多個連續扇區，然後文件分配表中表項的數量 決定了後面可用空間的簇的數量。文件分配表（FAT）在 FAT 系文件系統中這裏充當了兩個重要作用：

1. 管理簇空間分配。空間分配器可以掃描 FAT 判斷哪些簇處於空閒狀態，那些簇已經被佔用，從而分配空間。
2. 對現有文件，FAT 表中的記錄形成一個單鏈表結構，用來尋找文件的所有已分配簇地址。

目錄結構		
文件名. 擴展名	文件屬性	起始簇
文件名. 擴展名	文件屬性	起始簇
文件名. 擴展名	文件屬性	起始簇
文件名. 擴展名	文件屬性	起始簇

直觀上理解，FAT表像是數據區域的縮略圖，數據區域有多少簇，FAT表就有多少表項。 FAT系文件系統中每個簇有多大，由文件系統總容量，以及 FAT 表項的數量限制。 我們來看一下微軟文件系統默認格式化的簇大小（數據來源）：

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

用於軟盤的時候 FAT12 的簇大小直接等於扇區大小 512B ，在容量較小的 FAT16 上也是如此。 FAT12 和 FAT16 都被 FAT 表項的最大數量限制（分別是 4068 和 65460 ），FAT 表本身不會太大。 所以上表中可見，隨着設備容量增加， FAT16 需要增加每簇大小，保持同樣數量的 FAT 表項。

到 FAT32 和 exFAT 的年代，FAT 表項存儲 32bit 的簇指針，最多能有接近 4G 的 FAT 表項，從而表項數量理應不再限制 FAT 表大小，從而理應使用同樣的簇大小。不過事實上， 簇大小仍然根據設備容量增長而增大。 FAT32 上 256MiB 到 8GiB 的範圍內使用 4KiB 簇大小，隨後簇大小開始增加；在 exFAT 上 256MiB 到 32GiB 使用 32KiB 簇大小，隨後增加到 128KiB 。增加簇大小的原因是爲了限制 FAT 表整體的大小，因爲在使用 FAT 表的文件系統中，需要將 FAT 表整體裝入內存才能滿足文件訪問和簇分配時的性能，如果讀寫 FAT 表的範圍需要訪問磁盤，那麼整個文件系統的讀寫性能將暴跌到幾近不可用。到針對閃存優化的 exFAT 上，雖然在 FAT 表外還有額外簇分配位圖，但是也同樣要限制 FAT 表整體大小，減少對 FAT 表區域的隨機讀寫。

使用如此大的簇大小，導致的劣勢在於極度浪費存儲空間。