

FAT32 文件系统结构研究

邓 波

(四川经济管理学院 信息及计算机系, 四川 成都 610041)

摘要: Windows98 操作系统引入了 FAT32 文件系统,它解决了 FAT16 文件系统存在的诸多问题,但有关 FAT32 文件系统技术实质的文章尚未见诸报端。对 FAT32 文件系统的结构和技术实质进行了详细分析,揭示了 FAT32 文件系统存储和管理文件的算法。掌握 FAT32 文件系统的内部结构,可以使读者在更高层次上发挥操作系统的功能。

关键词: 文件分配表; 文件目录表; 文件系统; 操作系统

中图分类号: TP333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8395(2000)06-0665-05

1 概述

FAT32 文件系统实际上就是用 32 位数据来描述磁盘簇的分配,而传统的磁盘管理是用 16 个二进制位(2 个字节)来描述一个簇。从操作系统的结构上进行分析,可以知道 FAT32 文件系统并非仅仅简单地将 FAT 表转换成 32 位(即用 4 个字节来描述一个簇),而是带来了分区和 FDT 表及文件系统其它方面的巨大变化。为了彻底了解 FAT32 文件系统对操作系统的哪些方面进行了改变,本文对 FAT32 文件系统的完整结构进行了深入分析,其中包括对构成 FAT32 文件系统的主引导扇区(分区扇区)、分区引导扇区、FAT 和 FDT 表 4 个组件的分析。

FAT32 文件系统是 Windows98 操作系统为改善磁盘管理而推出的一项新的文件管理系统。由于它抛弃了与 MS-DOS 操作系统传统的 FAT16 文件系统的兼容性,采用了一些新的系统管理技术,所以更加适用于微机当前环境下新的硬件机制,必将给文件系统的管理带来新的活力和新的性能。通过理论分析可以知道, FAT32 文件系统具有以下特点^[1]:

(1) FAT32 文件系统支持更大的磁盘分区,最大可以支持 2 048 GB 的分区和逻辑磁盘。如此大容量的分区不但可以满足个人计算机的需要,而且可以满足网络服务器对分区大小的需要。

(2) FAT32 文件系统使用 32 位数据来描述簇,对于一个 2 GB 大小的硬盘来讲,理论上每个簇的大小可以是 1 个扇区(在 FAT16 文件系统中是 64 个扇区)。按较小的簇空间来进行分配,将大大减少

磁盘空间的浪费。当然为了在节约磁盘空间的情况下不降低系统性能,系统实际使用每个簇为 4 KB 的存储空间分配方案。当磁盘容量超过 8 GB 时,每个簇为 6 KB。使用 4 KB 的簇将使磁盘空间的利用率提高约 15 %。

(3) FAT32 文件系统采用浮动的 FDT 表,即 FDT 表不是固定在磁盘的控制区,而是可以在磁盘中浮动,并且可以根据根目录存储的文件数量调整其长度。

(4) FAT32 文件系统可以使用 FAT 表的备份(FAT16 文件系统中也有两份完全相同互为备份的 FAT 表,但操作系统一般不使用第 2 份 FAT 表)来校正和检查 FAT 表,从而降低了系统文件丢失的可能性。

FAT32 文件系统虽然带来了诸多好处,但也存在诸如不支持 MS-DOS 操作系统、不支持双操作系统的引导环境、不支持磁盘的休眠模式等诸多缺点。但这些缺点属于白璧微瑕,随着大容量硬盘的日益普及,使用 FAT32 文件系统将是大势所趋。

2 对 FAT32 文件系统主引导扇区的分析

主引导扇区是硬盘独有的一个磁盘控制数据存储区域,通常位于硬盘的 0 磁头 0 柱面 1 扇区。由于主引导扇区存放硬盘分区的有关数据,因此又称为分区扇区。在使用 FAT32 文件系统后磁盘的主引导扇区有什么变化呢?

2.1 主引导扇区的传统功能与作用 通过对硬盘

主引导扇区程序的分析,主引导扇区存储的数据主要由以下 3 个部分构成^[2]:

- (1) 引导系统启动的程序代码;
- (2) 硬盘的分区数据;
- (3) 主引导扇区的有效标志。

主引导扇区的首要功能是存储有关硬盘分区的数据,这些分区数据对硬盘是至关重要的。分区数据的丢失或破坏将导致硬盘上的逻辑磁盘不能被系统识别,当然也就无法访问磁盘上存储的文件和数据。

2.2 FAT32 文件系统对主引导扇区的改变 根据对 FAT32 文件系统主引导扇区的分析可知, FAT32 文件系统的主引导扇区在保持与 FAT16 文件系统主引导扇区兼容的基础上,针对 FAT32 文件系统的特特点作了适当的扩展。

FAT32 文件系统主引导扇区对分区表数据结构的扩展仅限于增加的 3 个标识 32 位分区的分区类型标志,这 3 个增加的分区类型标志分别为 OBH、OCH 和 OEH,用于描述 FAT32 文件系统的 3 种分区情况。对于扩展分区,则增加了一个类型标识 OFH,表示 Windows98 操作系统扩展分区。类型标志为 OBH 表示分区是 FAT32 分区,最大分区容量可以达到 2 047 GB;OCH 表示的意义与 OBH 相同,但是对于 INT13H 指令使用扩展的逻辑地址(LBA)方式;OEH 表示的意义与 06H 相同,但是对于 INT13H 指令使用扩展的逻辑地址(LBA)方式;OFH 表示的意义与 05H 相同(扩展分区),但是同样对于 INT13H 指令使用扩展的逻辑块地址方式。使用扩展的逻辑块地址方式是为了支持容量超过 8 GB 的大容量硬盘。

由于文件系统转化为 FAT32 后,分区的类型标志变化为 OBH、OCH 和 OEH,这些新的类型标志是原来 FAT16 文件系统所不能识别的,所以当用户使用 MS-DOS 操作系统的软盘启动系统后,机器不能识别硬盘的分区数据,当然也不能对硬盘的数据以文件为单位进行访问。

3 对 FAT32 文件系统分区引导扇区的分析

分区引导扇区用于启动存放在系统分区内的操作系统,每一个分区,实际上是每一个逻辑磁盘都包括一个引导扇区。分区引导扇区通常驻留在分区的第 1 个扇区——逻辑 0 扇区处。

3.1 FAT16 文件系统的分区引导扇区 FAT16 文件系统分区引导扇区是由引导系统启动的程序代码、逻辑磁盘参数和分区引导扇区有效标志 3 个部分构成。在分区引导扇区中最重要的部分是逻辑磁盘读写(称为 I/O)参数,引导系统启动的程序代码将使用这些参数来访问存储在磁盘上各文件的数据。I/O 参数从扇区偏移地址 03H 开始存放,共有 18 个数据项,占用 58 个字节(从扇区偏移地址 03H 到 3DH)。

3.2 FAT32 文件系统的分区引导扇区 在 Windows98 操作系统中,当文件系统从 FAT16 转化为 FAT32 后,分区引导扇区的功能和作用并没有改变,但是考虑到 FAT32 文件系统的特性和为了解决 FAT16 文件系统存在的问题,操作系统对 FAT32 文件系统的分区引导扇区进行了扩展。

3.2.1 分区引导扇区所占的扇区数从 1 个扇区扩展为 6 个扇区 分区扇区的核心功能是通过磁盘读写参数加载启动操作系统的文件,为了使加载文件的操作更加灵活,加上 FAT32 文件系统采用“活动”的 FDT 表,需要对分区引导扇区的引导程序代码进行重新的设计。同时考虑到引导程序的代码量和为今后发展保留适量的余量, FAT32 文件系统将分区引导扇区所占的扇区数从 1 个扇区扩展为 6 个扇区。当前版本的 Windows98 使用了前 3 个扇区作为系统的分区引导扇区,其余 3 个扇区保留暂未使用。

3.2.2 采用双重分区引导扇区 根据对分区引导扇区功能和作用的研究,我们知道分区引导扇区对于操作系统的启动和磁盘文件的访问具有至关重要的作用。引导程序代码的损坏将导致操作系统不能正常启动,磁盘读写参数的破坏将造成存储在磁盘上的文件不能正常读写。

由于分区引导扇区的重要性, FAT32 文件系统借鉴系统处理 FAT 表的经验,在磁盘保留了两份分区引导扇区,并且在启动时操作系统可以对两份引导扇区进行比较,以便选择正确的引导扇区来引导系统。由于在磁盘正常工作过程中系统不再对引导扇区的程序和数据进行修改,因此备份的分区引导扇区损坏的可能性非常小。

3.2.3 根据 FAT32 文件系统的特点对磁盘读写参数作了进一步的扩展 FAT32 文件系统的磁盘读写参数在部分保持与 FAT16 文件系统磁盘读写参

数兼容的基础上,为了适应 FAT32 文件系统的需要,对磁盘读写参数作了适当的扩展,所使用的字节数也从 FAT16 文件系统的 58 个字节扩展为 87

个字节. FAT32 文件系统的磁盘读写参数占用扇区偏移地址 03H 至 59H 的存储空间,各参数的含义如表 1 所示.

表 1 FAT32 文件系统磁盘读写参数

| 编号 | 起始偏移地址 | 占字节数 | 意 义 |
|----|--------|------|--|
| 1 | 03H | 8 | 操作系统的版本号 |
| 2 | 0BH | 2 | 每个扇区的字节数 |
| 3 | 0DH | 1 | 每簇扇区数 |
| 4 | 0EH | 2 | 为操作系统保留的扇区数 |
| 5 | 10H | 1 | FAT 表的个数 |
| 6 | 11H | 2 | FAT16 中存放系统根目录中允许登记的目录项个数, FAT32 中用于标注系统采用的是否为 FAT32 文件系统, 其值为 0000H 表示磁盘使用 FAT32 文件系统 |
| 7 | 13H | 2 | 值为 00H,为保持兼容性而保留,未使用 |
| 8 | 15H | 1 | 磁盘介质标志,硬盘为 F8H |
| 9 | 16 | 2 | 未使用,值为 00H |
| 10 | 18H | 2 | 每个磁道的扇区数 |
| 11 | 1AH | 2 | 磁盘的磁头个数 |
| 12 | 1CH | 4 | 分区前隐藏扇区的个数 |
| 13 | 20H | 4 | 逻辑磁盘中的扇区总数 |
| 14 | 24H | 4 | 每个 FAT 表所占的扇区数 |
| 15 | 28H | 2 | FAT 表镜像标志,值为 0 表示系统保存 2 份互为备份的 FAT 表,值为 1 表示系统仅保存 1 份 FAT 表 |
| 16 | 2AH | 2 | 文件系统的主次版本(保留) |
| 17 | 2CH | 4 | 磁盘根目录的起始簇号 |
| 18 | 30H | 2 | 文件系统参数的扇区号,通常位于引导扇区的下一个扇区 |
| 19 | 32H | 2 | 备份分区引导扇区的逻辑扇区号 |
| 20 | 34H | 12 | 保留,未使用 |
| 21 | 40H | 2 | 磁盘的物理驱动器号 |
| 22 | 42H | 1 | 磁盘读写参数扩展标志,其值为 29H |
| 23 | 43H | 4 | 磁盘卷的序列号 |
| 24 | 47H | 11 | 磁盘卷标号 |
| 25 | 52H | 8 | 文件系统的标识号(FAT32) |

4 对 FAT32 文件系统 FAT 表的分析

FAT 表是一张磁盘空间分配情况登记表,它以簇号的方式记录了簇的分配情况.在 FAT16 文件系统中,通常用 2 个字节来标记簇号分配的链表.对于 FAT32 文件系统来讲,其核心的改变就是使用 4 个字节来标记簇号分配的链表. FAT32 文件系统的命名就源自系统采用 32 位的 FAT 表结构,但是 FAT 表的变化反而不如其它磁盘控制区域数据的

变化大.除了采用 32 位 4 个字节作为一个簇的记录项和标记项等参数略有改变外,FAT 表中没有任何其它变化.根据 FAT32 文件系统的特点,32 位的 FAT 表中以下数据发生了变化.

4.1 保留簇的改变 在 FAT16 文件系统中,FAT 表中前 4 个字节为保留值,其中第 1 个字节作为磁盘的标志.采用 4 个字节作为保留值的理论依据来源于系统将编号为 0 和 1 的两个簇作为保留,文件数据区从第 2 个簇开始,故根据簇号链的计算公式

(簇号入口地址 = 簇号 $\times 2$), FAT 表的前 4 个字节就设计为保留值。

使用与 FAT16 文件系统相同的原理, 32 位 FAT 表也将 0 簇和 1 簇作为保留簇, 故 FAT 表的前 8 个字节为保留值, 其中第 1 个字节仍然作为磁盘标记。同时, 为了满足特殊文件系统的要求, FAT32 文件系统将第 2 个簇也同时作为保留簇, 用于记录 FDT 表的空间分配簇链登记项。

4.2 登记项的改变 32 位的 FAT 表用“00000000”项表示对应的簇号未分配; 用“0FFFFFFF8H”至“0FFFFFFFH”表示对应的簇是文件分配的最后一簇; 而“FFFFFFFF7H”则表示已损坏不能分配的簇。

由于 FAT 表中登记项的 32 位值中高 4 位为保留(总是 0), 故理论上 FAT32 文件系统可以表示的最大簇号为 268 435 450(2^{28}), 即用于实际描述簇号的位数为 28 位, 用前述公式读者不难计算出 FAT32 文件系统可以表示的最大磁盘空间。

5 对 FAT32 文件系统 FDT 表的深入分析

FDT 表的作用是记录文件的主名、扩展名、日期、属性、起始簇号和长度等信息, 从记录的内容来看, 除了文件的起始簇号外, 其它参数没有任何变化。另外, 从文件系统的结构来看, FDT 表本身将从磁盘控制区域内的固定位置变化为磁盘数据区中的浮动空间位置, 以解决磁盘根目录文件数量受到 FDT 表空间限制的问题。因此, 下面我们重点对浮动的 FDT 表和目录登记项中的起始簇号参数进行讨论。

5.1 浮动的 FDT 表 在 FAT16 文件系统中, 记录根目录文件参数的 FDT 表位于磁盘上 FAT 表和文件数据存储区之间的固定位置中, 通常为 32 个或 38 个扇区, 可以记录 512 个或 608 个文件的数据。由于存放根目录文件 FDT 表的空间是固定的, 因此根目录上存储的文件或文件夹的数量是有限的。对于各子目录下的 FDT 表, 操作系统采用文件管理的方式管理 FDT 表, 即使用 FAT 表来管理各子目录下 FDT 表所需要的存储空间, 当子目录下的文件数量超出当前 FDT 表允许的登记项的数量时, 操作系统为 FDT 表再分配一个簇, 用于存储目录项参数, 并同时在系统 FAT 表中登记上 FDT 表的分配簇链。所以, 从理论上讲, 子目录下存放的文件除了受到磁盘空间的限制外, 不受其它任何条件的限制。

FAT32 文件系统为了解决根目录 FDT 表空间受到限制的问题, 借鉴了子目录下 FDT 表的经验, 将根目录 FDT 表也以文件的形式来管理, 从而形成浮动的根目录 FDT 表。

浮动 FDT 表的结构实际上是固定部分和动态部分的有机结合, 其中固定部分通常为 1 个簇。在 FAT32 文件系统中, 1 个簇通常由 8 个扇区 4 KB 的存储空间构成, 所以固定部分可以记录的最大目录项数为 128 个。当然由于受 Windows98 长文件名附加目录项的影响实际允许记录的文件目录项将大大低于理论上的 128 个, 但这部分固定的 FAT 表空间确实可以满足基本的系统需要。根目录 FDT 表的固定部分同 FAT16 文件系统一样, 仍然位于最后一个 FAT 表的后面与数据存储空间之间的磁盘存储区域中。

在磁盘格式化时格式化程序将自动创建固定部分的 FDT 表, 如果系统是从 FAT16 文件系统转换为 FAT32 文件系统, 由于原来的 FDT 表已经位于该位置, 所以 FDT 表的固定部分也将优先建立在紧接 FAT 表的位置。

浮动 FDT 表主要体现在其动态部分, 即当根目录上存储的文件超过固定部分所能记录的数量后, 操作系统将为根目录的 FDT 表增加 1 个簇或多个簇的存储空间, 这部分新增加的存储空间不在原来固定部分的后面(那一部分存储空间早已分配给其它文件了), 而是磁盘数据存储区域中的任意一个未使用的存储空间。同时系统在 FAT 表的第 3 项(扇区偏移地址 08H)处记录了动态部分第一个簇的簇号, 动态部分其它簇的簇号则由操作系统根据 FAT 表的簇链登记准则进行相应的登记。由于动态部分实际上已经是一个可以按 FAT 簇链进行访问的文件, 因此从理论上分析, 根目录 FDT 表中允许登记的项数也就除了受磁盘空间限制外, 没有其它的任何限制了。但是, 为了避免由于根目录中登记项太多造成系统文件访问性能的下降(文件管理系统必须通过 FAT 表查找整个 FDT 表的存储空间), Windows98 操作系统规定根目录中的文件登记项数不能超过 65 535 个, 也就是根目录 FDT 表的存储空间不超过 4 096 个扇区。

另外, 值得特别关注的是, 在分区引导扇区的磁盘读写参数表中也同时存储了 FDT 表在 FAT 表中起始簇号的位置(参见表 1 中的第 17 项), 因此

操作系统完全可以改变 FDT 表的位置,不使用 FDT 表的固定部分。

5.2 32 位的文件存储空间起始簇号 FDT 表中另一个重要的参数是文件的起始簇号。在操作系统访问文件的数据时,将通过 FDT 表中存储的文件起始簇号计算出文件后续存储空间在 FAT 表中的偏移地址,并通过 FAT 表按顺序计算出存储文件数据的所有簇,然后才能对文件的数据进行读写操作。

Windows98 操作系统中实际采用的是一套折衷解决办法,即在 FDT 表的 32 字节目录项中寻找未使用的空间作为 4 个字节起始簇号的高 16 位,而将原有的 2 个字节起始簇号作为新的起始簇号的低 16 位,两者组合构成 32 位的起始簇号。

这种在现有存储空间中寻找补充字节方案的优点在于完全保持了与原有文件系统的兼容性,操作系统内核和文件系统不必做大的改变,也不必增加系统的资源开销。其缺点是文件的起始簇号没有连续的字节空间中存放,而是分隔在两处,使用户不易理解,同时也不可能解决 FDT 表固有的问题和不能给 FDT 表融入新的特性。

从 Windows98 操作系统 FDT 表的结构来看,每个 32 字节的目录项中只有 1 处还有两个连续的字节空间尚未使用,这两个字节就是目录项中的第 21

和第 22 字节,即位于记录文件修改日期和时间前面的 2 个字节。FAT32 文件系统就使用了这两个字节作为文件起始簇号的高 16 位,它们与原有的起始簇号(位于第 27 和第 28 字节)一起组合成 32 字节的文件起始簇号。

6 总结

根据本文对 FAT32 文件系统内部结构的分析可以知道, FAT32 文件系统对传统的 FAT16 文件系统进行了较为彻底地改造,除了通过减少每簇的容量降低了大容量磁盘存储空间的浪费外,同时也自动解决了 FAT16 文件系统对根目录 512 个文件记录项的限制,其优点是明显的。另外,由于系统可以使用的簇号资源增加,也自然解决了操作系统对大容量硬盘的支持问题。虽然 FAT32 文件系统不支持传统的 MS-DOS 操作系统,但在 Windows98 操作系统占绝对优势的今天,这个小小缺陷不可能阻碍 FAT32 文件系统的普及。可以预计,随着大容量硬盘的不断降价, FAT32 文件系统必将成为主流的文件系统。因此,本文所分析的 FAT32 文件系统的内部结构,不但可以使用户理解 FAT32 文件系统的实现机理,而且对高层次的用户开发直接访问 FAT32 文件系统数据的软件也具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] [美] Jim B, Kyle B. Windows95 高级适用指南[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [2] 张载鸿. DOS 高级技术分析[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

Investigation of FAT32 File System Structure

DENG Bo

(Department of Information and Computer, Sichuan Economic Management Institute, Chengdu 610041, Sichuan)

Abstract: The windows98 operating system has used FAT32 file system. The new file system has solved many problems of traditional FAT16 file system. No article about file system structure of FAT32 has been reported. This paper analyzed file system structure and technology essence in detail, and revealed algorithm of storage, and management files in FAT32.

Key words: FAT; FDT; File system; Operating system

(编辑 李德华)