


The Technical Principle and Data Recovery of
Solid-State Storage

固态存储

技术原理及数据恢复

刘永刚 张曦 袁建国 编著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

The Technical Principle and Data Recovery of
Solid-State Storage

固态存储

技术原理及数据恢复

刘永刚 张 曦 袁建国 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是为数据恢复爱好者撰写的一本实用参考书，作者根据长期的工作经验，由浅入深地介绍了固态存储设备的数据存储原理及其数据恢复的方法和思路，其内容包括固态存储技术的产生和发展、数据存储原理、故障剖析、案例分析。内容丰富，通俗易懂，实用性和可操作性强，读者通过对本书的学习，可以快速掌握固态存储的基础知识，了解固态存储的数据恢复的基本思路和技能。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

固态存储技术原理及数据恢复 / 刘永刚，张曦，袁建国编著. —北京：电子工业出版社，2017.10
ISBN 978-7-121-32808-4

I. ①固… II. ①刘… ②张… ③袁… III. ①存储技术—研究②数据保护—系统恢复—研究 IV. ①TP333②TP309.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 242682 号

策划编辑：祁玉芹

责任编辑：张瑞喜

印 刷：中国电影出版社印刷厂

装 订：中国电影出版社印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：21 字数：511 千字

版 次：2017 年 10 月第 1 版

印 次：2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价：49.80 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：qiyuqin@phei.com.cn。

编写组

主 编：刘永刚 张 曦 袁建国

编 委：白红军 蒋 铭 林 晨 王凯旋

管乐乐 王 芳 刘泽辰

前 言

preface

数据恢复技术就是通过各种手段把存储设备中丢失或遭到破坏的数据还原为正常数据的一门技术。

随着电子存储设备的广泛应用，误删、病毒破坏、硬件故障等问题也接踵而至，诸多事件说明我们在享受数据信息带来便利的同时，也不得不面对数据丢失带来的巨大损失。

相对于有价的存储介质，无价的数据更显得弥足珍贵。面对越来越多因为存储介质本身的软硬件故障、或人为因素造成的数据丢失问题，数据恢复技术同时也应运而生。

传统机械硬盘数据恢复过程主要是将保存在存储介质上的资料重新拼接整理，即使资料被误删或者硬盘驱动器出现故障，只要在存储介质的存储区域没有严重受损的情况下，还是可以通过数据恢复技术将资料恢复出来的。

固态存储的数据恢复解决方案尚处于起步阶段。固态存储技术异军突起、方兴未艾，它代表未来存储技术发展的方向，虽然厂商在开发时已经设计 ECC 校验，维修时可能通过更换内部部件、软件等方式，但实际应用中还是具有很多局限性。当负责储存数据的闪存颗粒有毁损，现时的数据修复技术是不可能损坏的芯片中救回数据的，就好像不可能从严重破损的盘片中恢复数据一样，所以，固态存储设备的数据恢复技术仍有很大的发展潜力。

本书从最基本的固态存储器的内部结构等的基础知识入手，系统介绍了固态存储器的数据存储原理及数据恢复思路，并列举了一些故障案例，使读者由浅入深地了解固态存储器故障处理方法以及相关工具的使用。

全书分为三大部分，第一部分是第 1 章~第 5 章，介绍了固态存储器的由来以及存储卡、U 盘、固态硬盘的相关基础知识；第二部分是第 6 章~第 11 章，介绍了固态存储器所使用的文件系统的相关原理；第三部分是第 12 章~第 15 章分别讲述了固态存储器数据恢复的一般原则、软件级数据恢复、元件级数据恢复、芯片级数据恢复的原理、思路以及案例分析。

本书适合从事数据恢复的工作人员和数据恢复的爱好者。希望经过我们的努力，帮助大家能够系统的了解固态存储的相关知识，数据恢复的基本思路，以便更好地保护好固态存储设备中的数据，在发生数据丢失时能够找到合理的解决方法予以挽救。

本书由刘永刚、张曦、袁建国主编，参加本书编写的还有蒋铭、林晨、王凯旋、白红军、管乐乐、王芳、刘泽辰、李桂梅、户媛媛、付佳欣、王攀、张永胜等。在此，编者对以上人员致以诚挚的谢意！

本书在编写过程中力求精益求精，但书中肯定有不少不足之处，恳请广大读者不吝批评指正。

编 者
2017 年 9 月

目 录

Contents

基础篇

第 1 章 固态存储技术概述	2
1.1 Flash 存储器的发展	2
1.1.1 内部存储器的发展	3
1.1.2 各类存储卡的发展	3
1.1.3 U 盘的发展	4
1.1.4 固态硬盘的发展	4
1.2 计算机内部存储器基础知识	5
1.2.1 计算机存储系统概述	5
1.2.2 计算机存储器工作流程	6
1.3 Flash 存储器简述	7
1.3.1 Flash 的制造	7
1.3.2 Flash 数据存储简介	9
1.3.3 Flash 技术特性	11
1.3.4 NOR Flash 与 Nand Flash 区别	12
第 2 章 Nand Flash 存储器基础知识	15
2.1 Nand Flash 种类	15
2.1.1 SLC、MLC、TLC 及 QLC 的含义	15
2.1.2 SLC、MLC、TLC 及 QLC 的存储原理	16
2.1.3 MLC 技术的改进	17

2.1.4	3D V-Nand 技术	17
2.2	Nand Flash 逻辑结构	18
2.3	Nand Flash 操作特点	19
第 3 章	Flash 存储卡基础知识	20
3.1	Flash 存储卡综述	20
3.2	Flash 存储卡的种类	23
3.2.1	CF 卡系列	23
3.2.2	SD 技术	25
3.2.3	MMC 卡	31
3.2.4	其他类型的存储卡	33
3.3	购买存储卡注意事项	43
3.4	存储卡使用注意事项	44
3.5	存储卡常见故障及解决方法	45
第 4 章	U 盘基础知识	47
4.1	USB 技术介绍	47
4.1.1	USB 的通信模型	48
4.1.2	USB 设备检测及初始化	48
4.1.3	USB 的性能特点	49
4.2	U 盘的结构	50
4.2.1	U 盘的结构简述	50
4.2.2	U 盘电路功能模块	51
4.2.3	U 盘工作原理	63
4.2.4	U 盘技术参数	63
4.2.5	U 盘使用注意事项	63
4.3	量产基本知识	64
4.3.1	量产定义	64
4.3.2	量产工具	64

4.3.3 量产案例	65
第 5 章 固态硬盘的基础知识	67
5.1 固态硬盘的定义	67
5.2 固态硬盘的种类	67
5.2.1 基于闪存的固态硬盘	67
5.2.2 基于 DRAM 的固态硬盘	68
5.2.3 基于 NRAM 的固态硬盘	68
5.3 固态硬盘的优缺点	69
5.3.1 优点	69
5.3.2 缺点	69
5.4 固态硬盘内部结构	70
5.4.1 控制模块	70
5.4.2 缓存模块	71
5.4.3 存储模块	71
5.4.4 接口模块	71
5.5 固态硬盘主控介绍	74
5.5.1 固态硬盘主流主控介绍	74
5.5.2 主控体系架构	74
5.5.3 固态硬盘主控固件	75
5.6 固态硬盘管理	76
5.6.1 映射表	76
5.6.2 重映射与垃圾回收	77
5.6.3 损耗平衡	78
5.6.4 TRIM	79
5.7 固态硬盘的优化	79
5.7.1 固态硬盘的使用环境优化	80
5.7.2 固态硬盘的分区优化	80
5.8 固态硬盘的使用	81

原 理 篇

第 6 章 固态硬盘文件系统介绍	84
6.1 固态硬盘文件系统概述	84
6.2 基于模拟块设备的通用文件系统	86
6.2.1 模拟块设备文件系统结构	86
6.2.2 FTL 的功能介绍	87
6.3 基于 Flash 的文件系统	88
6.3.1 嵌入式文件系统的特性	88
6.3.2 嵌入式日志型文件系统	89
6.3.3 嵌入式文件系统体系结构	91
第 7 章 FAT 文件系统	92
7.1 FAT 文件系统概述	92
7.2 FAT 文件系统组成	94
7.2.1 DBR 分析	94
7.2.2 文件分配表	95
7.2.3 文件目录表	97
7.3 FAT 文件系统各区域的相互关系	102
7.3.1 FAT16 文件系统各区域的关系	103
7.3.2 FAT32 系统各区域的关系	106
第 8 章 NTFS 文件系统	108
8.1 NTFS 的优点	108
8.2 NTFS 文件系统概念	109
8.3 NTFS 文件的引导扇区	111
8.4 NTFS 的元文件	112

8.4.1	NTFS 元文件的相关概念	112
8.4.2	NTFS 对磁盘及分区的区域划分	114
8.4.3	NTFS 访问卷的流程	114
8.4.4	NTFS 元数据文件及其功能	114
第 9 章 ExFAT 文件系统		118
9.1	ExFAT 简介	118
9.2	ExFAT 格式综述	119
9.2.1	ExFAT 存储结构	119
9.2.2	VBR 结构	120
9.3	ExFAT 文件系统的 FAT 表分析	122
9.3.1	FAT 表的结构特点	122
9.3.2	FAT 表的实际应用	123
9.4	ExFAT 文件系统的簇位图文件分析	125
9.5	大写字符文件分析	125
9.6	ExFAT 文件系统的目录项分析	126
9.6.1	ExFAT 目录项的结构特点	126
9.6.2	ExFAT 文件系统根目录项与子目录项的管理	133
第 10 章 ExtX 文件系统		143
10.1	ExtX 文件系统的发展简史	143
10.2	ExtX 文件系统简介	144
10.2.1	Ext2 (The second extended file system)	144
10.2.2	Ext3 (The third extended file system)	145
10.2.3	Ext4 (The fourth extended file system)	146
10.3	基本概念	147
10.4	Ext4 文件系统架构分析	151
10.4.1	Ext4 文件系统布局综述	151
10.4.2	数据块和 Inode 分配策略	154

10.5	超级块	154
10.5.1	超级块数据结构	154
10.5.2	相关数据结构知识解释	156
10.6	块组描述符和块组描述符表	159
10.7	数据块位图与 inode 位图	160
10.8	extent 与 i-节点	161
10.8.1	Ext3 数据块映射	161
10.8.2	extent	162
10.8.3	i-节点表与 i-节点数据结构	166
10.9	目录项	171
10.9.1	线性目录	172
10.9.2	哈希树	172
10.10	文件系统日志	176
10.10.1	Ext4 文件系统日志特点	177
10.10.2	文件系统日志结构	177
第 11 章	YAFFS 文件系统	181
11.1	应用背景	181
11.2	文件系统组织结构	182
11.3	文件存储过程	184
11.4	垃圾回收机制	187
11.5	文件地址映射表的建立	188
11.6	闪存扫描与 checkpoint	189
11.7	关键流程解析	192
11.7.1	挂载流程	192
11.7.2	打开流程	193
11.7.3	读取流程	194
11.7.4	写入流程	194
11.7.5	删除流程	194

11.7.6 垃圾回收	195
11.8 数据恢复思路	195

实 战 篇

第 12 章 固态存储的数据恢复原则	198
12.1 数据恢复基本知识	198
12.1.1 故障类型及诊断	198
12.1.2 数据恢复基本原则	200
12.2 数据恢复的方法类别	201
12.2.1 镜像	201
12.2.2 置换	202
12.2.3 旁路	202
12.2.4 修复	203
12.2.5 雕复	203
12.3 Flash 设备的数据获取	205
12.3.1 逻辑级获取	205
12.3.2 物理级获取	209
12.3.3 芯片级获取	210
12.4 固态存储的数据恢复工具	212
12.4.1 软件级恢复常用工具	213
12.4.2 元件级恢复常用工具	213
12.4.3 芯片级恢复常用工具	214
第 13 章 固态存储的软件级恢复	215
13.1 分区表的修复	215
13.1.1 分区表基础知识	215
13.1.2 分区表故障原因	220

13.1.3	分区表故障修复思路	221
13.1.4	减少分区表发生故障的相关措施	222
13.1.5	分区表修复案例	222
13.2	FAT 文件系统恢复	224
13.2.1	文件的查找	224
13.2.2	文件的删除	228
13.2.3	FAT 系统对长文件名的管理	233
13.2.4	FAT 系统对子目录的管理	235
13.2.5	FAT32 文件系统数据恢复案例	239
13.3	NTFS 文件系统恢复	244
13.3.1	NTFS 文件系统中文件删除特征	244
13.3.2	常驻属性与非常驻属性	247
13.3.3	NTFS 数据恢复实例	248
13.4	ExFAT 文件系统恢复	251
13.4.1	ExFAT 文件系统删除文件的分析	251
13.4.2	ExFAT 文件系统误格式化的处理	252
13.4.3	ExFAT 文件系统数据恢复思路	258
13.5	Extx 文件系统恢复	260
13.5.1	Ext4 数据恢复基本思路	260
13.5.2	数据恢复注意事项	261
13.5.3	数据恢复案例	261
13.6	YAFFS 文件系统恢复	263
13.7	sqlite 数据库恢复	265
第 14 章	固态存储设备的元件级修复	267
14.1	常见元件识别与故障诊断	267
14.1.1	晶体振荡器	267
14.1.2	电阻器	268
14.1.3	电容器	269

14.1.4	电感器与磁珠	271
14.1.5	二极管	272
14.1.6	三极管	273
14.1.7	片状集成电路	275
14.2	焊接缺陷与检查	276
14.2.1	虚焊	276
14.2.2	搭焊	277
14.2.3	堆焊	278
14.2.4	松动	278
14.2.5	拉尖	278
14.2.6	焊接缺陷的检查	278
14.3	Flash设备的元件级维修	279
14.3.1	芯片拆焊	280
14.3.2	拆焊后处理	280
14.3.3	芯片焊接	281
14.3.4	焊接后处理	282
14.3.5	环境因素对焊接质量的影响	283
14.4	元件级维修案例介绍	284
第 15 章 固态存储设备芯片级恢复		286
15.1	芯片级恢复一般流程	286
15.1.1	处理 Flash 芯片	286
15.1.2	连接 Flash 读取设备与计算机	288
15.1.3	创建恢复任务	288
15.1.4	读取 Flash 芯片镜像	291
15.1.5	查找现有解决方案	294
15.1.6	数据存储算法分析	298
15.2	文件系统元数据	300
15.2.1	MBR/EBR	300

15.2.2	保护 MBR/EFI	300
15.2.3	DBR	301
15.2.4	FAT 表项	302
15.2.5	MFT 表项	302
15.2.6	FAT 特殊目录项	303
15.3	数据存储算法分析	303
15.3.1	芯片整体加密判断	303
15.3.2	页结构分析	306
15.3.3	分离结合判断	309
15.3.4	分区判断	311
15.4	芯片级恢复案例介绍	312
15.4.1	人工辅助分析案例	312
15.4.2	纯人工分析案例	316

基 础 篇

本篇导读

- 第 1 章 固态存储技术概述
- 第 2 章 Nand Flash 存储器基础知识
- 第 3 章 Flash 存储卡基础知识
- 第 4 章 U 盘基础知识
- 第 5 章 固态硬盘的基础知识

第 1 章 固态存储技术概述

固态存储器是相对于磁盘、光盘一类的，不需要读写磁头的移动及盘片的转动来读写数据的存储器。

固态存储器是通过存储芯片内部晶体管的开关状态来存储数据的，由于固态存储器没有读写头，不需要转动，所以固态存储器拥有耗电少、抗震性强的优点，在超高速、小体积的电子设备中，固态存储器拥有非常大的优势。

在电子设备中，固态存储器的应用非常广泛。比如，计算机主板的 BIOS 就是存储在固态存储器中的。

在高速数据交换设备中，由于固态存储器使用晶体管来存储数据，所以在高频率下，固态存储器可以进行非常快速的数据交换。比如，内存和 CPU 中的高速缓存。

在超小体积的设备中，固态存储器扮演着举足轻重的地位。因为有固态存储器，我们的电子设备才能做得更小。橡皮大的 MP3 播放器、小到只有指甲盖大的 U 盘和内存卡，这些都在方便我们的生活。

随着制作工艺的提高，单位面积内的晶体管数量不断增加，单位面积的数据容量也在不断提高。由固态存储器制成的固态硬盘已经逐步克服了早期低容量的缺点，开始大量使用。

航天领域是从 20 世纪 90 年代初开始研制固态大容量数据存储器的，1996 年开始投入商业应用。以美国 TRW 卫星研制公司（现为美国 VCI 公司）和欧洲 ASTRIUM 公司为代表，生产出了第一代大容量固态存储器。如 TRW 公司为美国 NASA 的 CASSINI 航天器设计的大容量固态存储器的存储容量为 2Gbits，每个存储模块为 4Mbits，结构为 DRAM 器件，输入或输出数据速率分别为 2Mbps。欧空局 CLUSTER1 卫星也采用了相关产品，技术指标均优于当时同类航天器，如伽利略和哈勃望远镜等使用的磁带机。随着半导体存储芯片集成密度的不断增加及相关技术的发展，在功耗、体积、重量一定的情况下，固态大容量存储器的存储容量、寿命及输入、输出速率得到了迅速的发展。21 世纪初，第二代大容量固态存储器问世，其结构为 SDRAM 器件，每个存储模块可达 2Gbits，输入或输出数据速率可达 20Mbps。受集成度及价格的约束，如今大容量固态存储器已经很少采用 SRAM 芯片作为主存储介质，而基于闪存技术的 Flash 芯片已经占据了主流地位。

1.1 Flash 存储器的发展

随着手机、数码相机、U 盘、MP3、固态硬盘等电子产品的广泛使用，Flash 存储器与人们生活已变得密不可分。其实，Flash 存储器技术发展到今天，按用途分大致经历了四个