

引用格式:柴权珂,严华.基于无效页年龄的 NAND 闪存垃圾回收算法[J].微电子学与计算机,2021,38(3):8-13. [CHAI Q K,YAN H. Garbage collection algorithm for NAND flash memory based on invalid page age[J]. Microelectronics & Computer, 2021,38(3):8-13.]

基于无效页年龄的 NAND 闪存垃圾回收算法

柴权珂^{1,2}, 严 华^{1,2}

(1 四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065;2 电子信息控制重点实验室,四川 成都 610036)

摘 要:针对现有 NAND 闪存垃圾回收算法对回收效率和数据冷热分离考虑的不足,提出了一种基于无效页年龄的 NAND 闪存垃圾回收算法.该算法提出了新的回收块选择策略,用无效页年龄计算回收代价,同时使用静态磨损的方法保证了物理块的磨损均衡.此外,算法重新定义了逻辑页数据热度计算公式,提出使用动态调节的阈值将有效数据分为热数据、次热数据、次冷数据和冷数据,将不同类型的数据迁移到不同的空闲块中,有效实现了逻辑页数据的冷热分离.实验结果表明,与 GR,CB,CAT,FaGC,FaGC+算法相比,该算法取得了最小的垃圾回收代价以及更好的磨损均衡效果.

关键词: NAND 闪存;垃圾回收;无效页年龄;磨损均衡;冷热分离

中图分类号: TP316. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2021)03—0008—06

Garbage collection algorithm for NAND flash memory based on invalid page age

CHAI Quan-ke^{1,2}, YAN Hua^{1,2}

(1 College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2 Science & Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610065, China)

Abstract: A new NAND flash memorygarbage collection algorithm based on invalid page age was proposed to solve the problems of the existing NAND flash garbage collection algorithm, which considered the efficiency of the collection and the separation of hot and cold data. This algorithm proposeda new victim block selection strategy which calculated collection cost use number and age of invalid pages, while use static wear to ensure wear leveling. In addition, the algorithm redefines the heat calculation formula of the logical page data, and proposes to divide the valid data into hot data, sub-hot data, sub-cold data and cold data by using the dynamically adjusted threshold value. Different types of data are transferred to different idle blocks, which effectively realizes the separation of cold and hot of the logical page data. The simulation results show that compared with GR, CB, CAT, FaGC and FaGC+ algorithms, the proposed algorithm achieves minimum collection cost and better results in wear leveling.

Key words: NAND flash; cold and hot separation; wear leveling; garbage collection; dynamic threshold

1 引言

NAND 闪存具有速度快、容量大、价格低廉等优点,在消费电子产品中获得越来越多的应用.一般的,一片 NAND 闪存由多个物理块(block)构

成,每个物理块由多个物理页(page)组成^[1].物理页是 NAND 闪存读写的基本单位,物理块是 NAND 闪存擦除的基本单位.与磁盘不同,NAND 闪存不能进行覆写操作,即物理块上的数据不能直接修改,必须擦除物理块后才能写入^[2].为了解

决这一问题,NAND 闪存一般采用“异地更新”策略更新数据,即将新数据写到其他空闲页,原数据页标记为无效页.随着“异地更新”策略的进行,闪存中的无效页不断增多,空闲空间减少,需要对无效页占据的空间进行垃圾回收.垃圾回收由以下几个步骤组成:(1)选择回收块;(2)将回收块中的有效页迁移到空闲页;(3)擦除回收块.NAND 闪存擦除操作需要的时间和能耗远大于读写操作,过多的擦除操作会大大增加系统的响应时间和功耗.此外 NAND 闪存中每个物理块均有擦除次数上限,达到擦除次数上限的物理块将无法正常使用,保证物理块擦除次数均衡是提升 NAND 闪存寿命的关键.因此,降低垃圾回收的代价、减少物理块的擦除次数同时考虑 NAND 闪存磨损均衡就成了垃圾回收算法考虑的重点.

Michael Wu 等人提出 GR(Greedy Algorithm)算法^[3],选择有效页最少的块进行垃圾回收,GR 算法回收代价较小,但在数据非随机写入时磨损均衡效果较差.Kawaguchi A 等人提出 CB(Cost-Benefit)算法^[4],此算法考虑块的年龄,获得了比 GR 算法更好的磨损均衡效果.Chiang M L 等人提出 CAT(Cost-Age-Time Algorithm)算法^[5],在 CB 算法的基础上增加考虑了物理块的擦除次数,并提出了冷热数据分离的概念,回收时将冷数据和热数据分别写到不同的块中,CAT 算法较前两种算法取得了更好的磨损均衡效果.Ohhoon Kwon 等人提出 FeGC(Fast and endurant Garbage Collection)算法^[6],选择无效页年龄和最大的块作为擦除块,同时在数据迁移时进行冷热分离,最终明显提升了磨损均衡程度.以上算法均是基于物理页,没有考虑到逻辑页.

Yan H 等人提出 FaGC(File-aware Garbage Collection)算法^[7],建立热度索引表,根据逻辑页热度选择不同的空闲块迁移,同时提出了静态磨损方法,即在一定条件下直接选择擦除次数最少的物理块进行垃圾回收.最终获得了较低的垃圾回收代价,磨损均衡效果明显提升.但 FaGC 算法回收块选择策略仍主要采用 GR 算法,导致擦除和拷贝次数仍然较多.Huang Y 等人提出 FaGC+算法^[8],对 FaGC 算法做了改进.使用逻辑页序号计算热度,降低了更新时间对系统的影响.同时,还提出了新的回收块选择策略,有效降低了垃圾回收代价,一定程度上改善了磨损均衡效果.但 FaGC+算法只计算无效页的累积年龄,并不能体

现每个无效页的年龄;同时使用累积热度进行数据冷热分离,可能导致历史热度和当前更新频率的权重问题.

针对上述算法的不足,本文提出一种基于无效页年龄的 NAND 闪存垃圾回收算法 LPAGC(Logic Page Age based Garbage Collection),该算法计算回收策略启动时无效页的年龄,并据此选择擦除块;提出新的逻辑页热度计算方式,根据逻辑页更新次数和更新序号差值直接计算热度,避免了历史热度和当前更新频率的权重问题;同时使用动态阈值对有效数据进行冷热分离,最终取得了较好的磨损均衡效果.

2 相关工作

2.1 基本结构

图 1 展示了 NAND 闪存文件管理系统存储结构,主要包括虚拟文件系统(VFS)、YAFFS2 文件系统、内存技术设备(MTD)和 NAND 闪存设备.其中 VFS 为上层用户应用提供统一的接口,向下整合了不同文件系统的调用接口,YAFFS2 文件系统提供了一系列的 NAND 闪存管理功能,如地址映射、垃圾回收等.YAFFS2 通过 MTD 提供的统一访问接口对 NAND 闪存进行读、写和擦除操作.

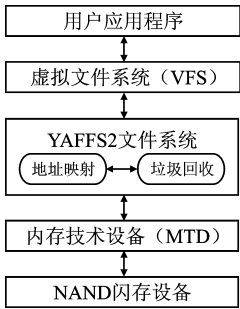


图 1 NAND 闪存存储结构

YAFFS2 文件系统提供物理页到逻辑页的映射功能,通过构建映射表,能够高效的找到用户文件实际的物理存储地址.物理页是 NAND 闪存实际存储数据的载体,逻辑页是物理页在文件系统中的表示,在 YAFFS2 文件系统中逻辑页和物理页大小相同.

2.2 主要策略

本文提出了一种新的基于无效页年龄的 NAND 闪存垃圾磨损均衡算法,算法包括回收块选择策略、磨损均衡策略和数据冷热分离策略.以下分别介绍这三种策略的基本概念和以往算法的策略.

当 NAND 闪存存储空间不足时,需要启动回收块选择策略,选择一个物理块擦除,释放物理空间。好的回收块选择策略旨在以较少的擦除操作取得尽可能多的空闲空间。FaGC+算法计算每个块无效页序号的累积差值,累积差值最大的块作为擦除块。计算公式如下:

$$CPS = \sum_{i=0}^n (D_i) \quad (1)$$

$$D_i = S_{k+1} - S_k \quad (2)$$

式中, n 为物理块中无效页的数量, S_{k+1} 为第 i 页变为无效页的序号, S_k 为第 $i-1$ 页变为无效页的序号。因为只记录物理块中两个无效页序号的差值,可以节省一定的存储空间,但在实际应用中,某个块中的页可能在短时间内连续变为无效页,而垃圾回收可能在很久之后启动,这会导致回收块选择策略无法选取到无效页最多的老块,影响回收效率。

为了延长 NAND 闪存的使用寿命,使物理块以相近的速率磨损,算法引入了磨损均衡策略。当物理块擦除次数均衡度较差,各个物理块擦除次数相差较大时启动磨损均衡策略,优先选用擦除次数较少的块作为回收块。FaGC+算法直接选择擦除次数最少的物理块作为回收块,这样可以直接改善物理块磨损均衡程度,但是部分长时间未更新的物理块难以被选中。

在擦除回收块之前需要将回收块中的有效数据迁移到其他空闲块中。热度(一般由数据更新频率决定)相近的数据更有可能同时变为无效数据,根据有效数据的热度将数据迁移到不同的块中,这就是冷热分离策略。FaGC+算法根据历史热度和当前逻辑页序号计算数据热度值,再分离热度不同的数据。FaGC+根据逻辑页序号,常数地改变热度值,通常难以平衡历史热度与当前更新频率的计算权重。另外,常数值的选用也会影响算法的效果,使得算法很难获得最佳表现。

3 LPAGC 算法描述

本节介绍提出的算法 LPAGC,主要包括页序号概念、回收块选择策略、磨损均衡策略和数据冷热分离策略。

3.1 页序号

本文使用 FaGC+提出的页序号记录数据更新顺序。使用策略如下:

(1)在文件系统中新增一个计数器,初始值为

1,称为页序号,每当分配新的空闲页时,页序号加 1。页序号是一个全局信息量。

(2)在内存中记录每个逻辑页最后一次更新时的页序号值。

(3)在内存中记录每个物理页无效时的页序号值。

如图 2 所示,在 step1 中共有 6 个数据页,对应的逻辑页序号在内存中分别记录为 1 到 6,此时页序号为 6,下一个页序号为 7。在 step2 中逻辑页 3 迁移到 block3,block2 中原来的页变为无效页,记录该无效页的页序号为 6,block3 中有新的页被分配,页序号加 1,逻辑页 3 的页序号被更新为 7。逻辑页 4 的迁移过程类似。

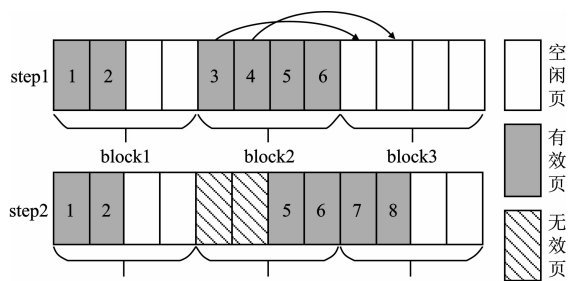


图 2 页序号使用示例

3.2 回收块选择策略

本文组合使用两种回收块选择策略,动态回收选择策略和静态磨损均衡策略。

3.2.1 动态回收选择策略

动态回收策略不考虑物理块的磨损均衡,LPAGC 每次选取 BM(Benefit of Migration)值最大的物理块擦除。动态回收策略优先选择无效页多且老的物理块,能有效减少物理块的擦除次数和数据拷贝次数。BM 值计算如式(3)。

$$BM = \frac{1-u}{1+u} \sum_{i=0}^n (S - P_i) \quad (3)$$

式中, S 为垃圾回收启动时的页序号, n 为物理块中无效页的数量, P_i 为逻辑页 i 变为无效页时的页序号。 $S - P_i$ 表示无效页的年龄,该值越大代表该无效页存在的时间越久。 u 为物理块中有效页比例, u 取值范围是 $[0, 1]$ 。 $1 - u$ 表示回收该物理块能获得的收益, $1 + u$ 表示该块的迁移代价。动态回收选择策略优先选择无效页年龄之和最大的块,BM 值衡量了物理块中无效页的年龄和数量,同时考虑了擦除该物理块的代价和能获得的收益,因此 BM 值大的物理块更应该被回收。

3.2.2 静态磨损均衡策略

数据非随机写入时只使用动态回收选择策略难以达到较好的磨损均衡效果,因此引入静态磨损均衡策略.静态磨损均衡策略旨在直接提高物理块的磨损均衡程度,使所有物理块以相近的速率磨损.选择 AE(Age and Erase)值最小的块擦除,即优先选择擦除次数少的老块. AE 值计算如式(4):

$$AE = e * Seq \quad (4)$$

式中, e 为物理块的擦除次数, Seq 表示物理块的分配顺序, Seq 值小的物理块分配较早,已经较久没有擦除,应该优先擦除.静态磨损均衡策略优先选择冷块擦除,可以保证 NAND 闪存中的物理块以相近的速率磨损.当选择的擦除块具有较多有效页时需要大量的数据迁移和拷贝工作,这会大大增加系统读写次数,降低系统性能,因此平衡动态回收选择策略和静态磨损均衡策略的启动次数是非常重要的.

3.2.3 策略切换

定义 E_{diff} 为当前回收的次数和上一次启动静态磨损均衡策略时回收次数的差值. T_{ul} 为两种回收策略的切换阈值,即 T_{ul} 为两次静态磨损均衡策略间动态回收策略的启动次数, E_{diff} 和 T_{ul} 计算公式如下:

$$E_{diff} = G_{current} - G_{last} \quad (5)$$

$$T_{ul} = (1 - \alpha) * T_{init} - (e_{max} - e_{min}) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{N_{valid}}{N_{block}} \quad (7)$$

式中, $G_{current}$ 为当前回收次数, G_{last} 为上一次启动静态磨损均衡策略时的回收次数, T_{init} 为初始阈值,是一个常数值.定义全为有效页的物理块为全有效块, α 表示全有效块占有物理块的比例. e_{max} 为物理块最大擦除次数, e_{min} 为物理块最小擦除次数.每次静态磨损均衡策略完成后更新 T_{ul} ,每次动态回收块选择策略完成后更新 α .

当 $E_{diff} < T_{ul}$,采用动态回收选择策略,当 $E_{diff} \geq T_{ul}$,NAND 闪存的磨损均衡效果变差,启动静态磨损均衡策略.与 E_{diff} 的定义结合,两种选择策略的切换解释为:每启动 T_{ul} 次动态回收选择策略,就必须启动一次静态磨损均衡策略,其中 T_{ul} 根据全有效块比例和物理块最大最小擦除次数改变.

在式(3)的计算中,全有效块的 BM 值为 0,难以被选为擦除块.全有效块的大量存在是导致磨损均衡效果变差的主要原因,因此 T_{ul} 值的计算需要考虑有效块的数量.当全有效块的数量较少时,需要的

静态磨损均衡次数较少,此时较大 T_{ul} 值即可实现良好的磨损均衡效果;反之,如果 NAND 闪存中存在大量的全有效块,则需要更小的 T_{ul} 值,更加频繁地启动静态磨损均衡策略.静态磨损均衡策略和动态回收选择策略的执行顺序如图 3.

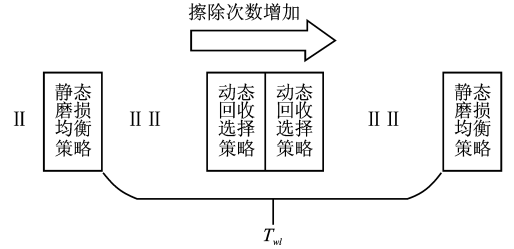


图3 回收块选择策略执行顺序

3.3 数据冷热分离

LPAGC 算法基于逻辑页热度对数据冷热分离,LPAGC 算法将有效数据分为垃圾回收过程中的迁移数据和新数据.根据数据热度将数据分为热数据、次热数据、次冷数据和冷数据四类,分别存放到不同的空闲块(经过擦除操作的块)中.一般的,存储热数据的页很大概率同时变为无效页,导致块中的无效页增多.垃圾回收时块中的无效页越多,需要拷贝的有效页越少.因此,将数据冷热分离,能获得更大的回收效率.此外,将热数据迁移到擦除次数较少的块中有助于物理块磨损均衡.

LPAGC 算法通过计算迁移数据被更新的次数和数据写入时的页序号得到迁移数据的热度.为了避免历史热度和更新频率之间的权重问题,提出新的热度计算方式,热度计算更为精确.逻辑页热度计算公式定义如下:

$$H_i = \omega * c_i + (1 - \omega) * S_{diff} \quad (8)$$

$$S_{diff} = \begin{cases} S_{max} - S_p, & 0 \leq S_p \leq S_{max} \\ 0, & S_p > S_{max} \end{cases} \quad (9)$$

$$S_p = (S_{now} - S_i) / p \quad (10)$$

式中, H_i 表示逻辑页 i 的热度, c_i 表示逻辑页 i 的更新次数, S_{now} 为当前页序号, S_i 为逻辑页 i 最后一次更新时的页序号.设定调节参数 p 和页序号最大差值 S_{max} ,用来降低页序号差值对热度计算的影响,避免页序号差值过大成为唯一主导计算的因素. ω 为 0 到 1 的常数,用来平衡逻辑页更新次数和年龄的权重.综合来看,逻辑页更新次数越多,更新间隔越短,逻辑页数据热度值越高.新数据没有更新次数和页序号值,统一设定为次热数据.

LPAGC 算法根据动态阈值对有效数据进行分类,将热度值相同的数据放入同一类物理块中,逻辑

页数据迁移过程见图 4,具体执行步骤如下:

- (1) 根据式(8) 计算出有效页 i 的热量 H_i .
- (2) 当 $H_i > 2 * e_{max}$,该逻辑页数据分类为热数据,写入擦除次数最少的空闲块中.
- (3) 当 $e_{max} < H_i \leq 2 * e_{max}$,该逻辑页数据分类为次热数据,写入擦除次数最少的空闲块中.
- (4) 当 $1/2 * e_{max} < H_i \leq e_{max}$,该逻辑页数据分类为次冷数据,写入擦除次数最多的空闲块中.
- (5) 当 $H_i \leq 1/2 * e_{max}$,该逻辑页数据分类为冷数据,写入擦除次数最多的空闲块中.
- (6) 数据迁移完成后,逻辑页更新次数加一,逻辑页序号均被设定为当前页序号.

式中, e_{max} 为物理块最大擦除次数. 对于非随机写入,随着读写次数增加,式(8) 中有效页的更新次数 c_i 增加,热度计算值增加,固定的阈值难以准确划分动态增长的热量. LPAGC 算法引入动态变化的 e_{max} 来衡量数据的热度. 在物理块磨损均衡的情况下,物理块最大擦除次数随着读写次数的增加平稳增加,选用物理块最大擦除次数作为划分热度的阈值能取得较好的效果.

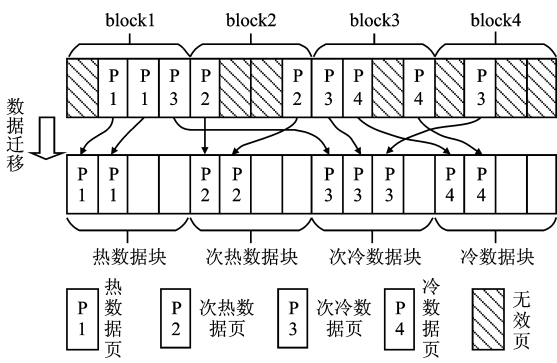


图 4 有效页数据迁移

4 实验及分析

4.1 实验环境

实验使用 VMware 和 Ubuntu12.04 平台,使用 QEMU 搭建嵌入式 Linux 仿真环境,使用 NANDSim 模拟 NAND 闪存,并对嵌入式文件系统 YAFFS2 进行了移植,最后编写测试程序进行测试.

采用和 FaGC、FaGC+ 相同的测试数据生成方式,测试程序随机生成大小为 16 kB 到 1 024 kB 的文件,测试文件总大小占 NAND 闪存容量的 90%,对其中 15% 的文件按齐夫分布进行更新. 实验中 NAND 闪存容量设置为 64 MB,其中包含 512 个物理块,每个物理块包含 64 个物理页,每个页大小为

2 kB. 为对算法性能进行公平比较,关闭 YAFFS2 文件系统的缓存功能,所有算法均使用 aggressive 模式,且 LPAGC 和 FaGC、FaGC+ 初始阈值 T_{init} 相同. 实验中各项参数设定见表 1.

表 1 实验参数设定值

T_{init}	N_{block}	w
100	512	1/3

4.2 实验结果

实验对比 GR, CB, CAT, FaGC, FaGC+, LPAGC 算法,从物理块擦除次数、页拷贝次数、物理块擦除次数标准差和物理块擦除分布情况等方面进行分析. 物理块擦除次数和页拷贝次数体现了垃圾回收策略的回收效率,擦除和拷贝次数越少,则回收策略效率越高. 物理块擦除次数标准差和擦除次数分布体现了磨损均衡效果,物理块擦除次数分布越一致,擦除次数标准差越小,代表磨损均衡效果越好, NAND 闪存的使用寿命越长.

如图 5、图 6 和表 2 所示,LPAGC 算法在物理块擦除次数和有效页拷贝次数上均少于 GR、CB、CAT、FaGC、FaGC+ 算法. LPAGC 将回收块中的有效数据分为四类,更新频率相近的数据迁移到相同的块中,使得回收块中无效页比例增加. 此外,相比于 FaGC+ 算法,LPAGC 算法使用新的方式计算物理块的回收代价,能更精确的计算每个无效页的年龄,从而降低垃圾回收的代价,每次回收能获得更多的空闲页,最终减少了物理块总擦除次数和有效页的拷贝次数.

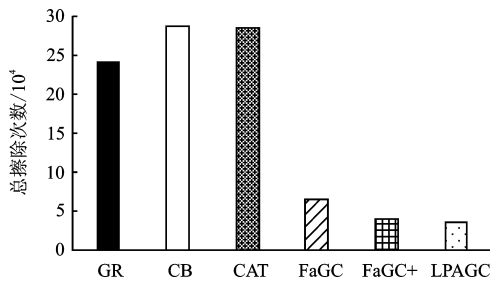


图 5 块擦除次数对比

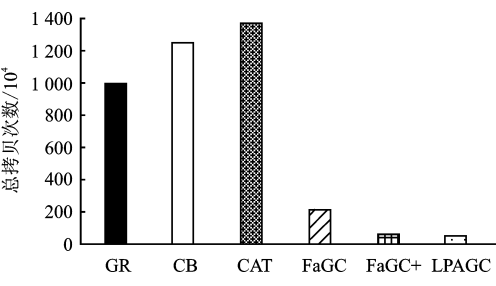


图 6 页拷贝次数对比

表 2 实验数据

垃圾回收 算法	块擦除 次数/ 10^4	页拷贝 次数/ 10^4	擦除次数 标准差
GR	24.1	998.1	95
CB	28.7	1 256.5	39
CAT	28.5	1 378.2	33
FaGC	6.4	219.4	10.9
FaGC+	4.1	61.8	3.9
LPAGC	3.8	50.0	2.4

图 7 展示了各个算法的物理块擦除次数的标准差.可以看出 FaGC、FaGC+、LPAGC 算法的磨损均衡表现明显优于其他算法.这是因为 GR 算法仅考虑回收有效页最多的块,未考虑磨损均衡,CB 算法增加了对物理块年龄的考量,CAT 算法将冷热数据写到不同的块中,磨损均衡表现较 GR 有较大提升.FaGC 算法使用 GR 算法的回收块选择策略,没有兼顾无效页的年龄和数量,均衡效果相对较差.相较于 FaGC+算法,LPAGC 使用无效页年龄计算回收代价,同时避免历史热度计算逻辑页当前热度带来的问题,数据热度分类更加精确.因此 LPAGC 取得了更好的磨损均衡表现.

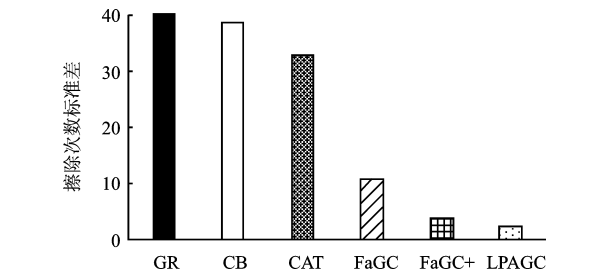


图 7 物理块擦除次数标准差对比

图 8 展示了各个算法的物理块擦除次数分布情况.可以看出,GR、CB 和 CAT 算法物理块擦除次数较为离散地分布在较大范围的区域,数据一致性较差.FaGC 算法引入了逻辑页的冷热分离,最终数据点分布较为集中.FaGC+算法获得了良好的表现,所有数据点均分布在很小的范围内.LPAGC 算法较 FaGC+仍有提升,取得了所有算法中最好的效果.

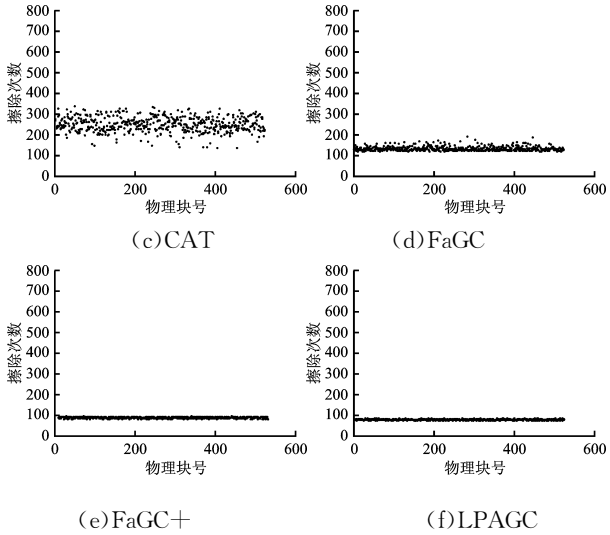
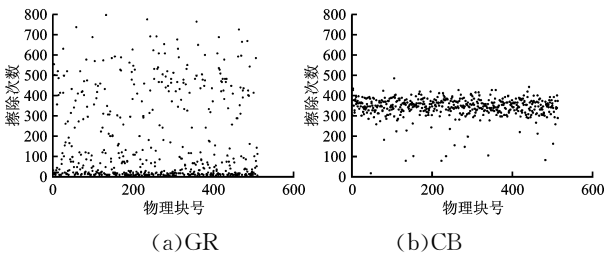


图 8 物理块擦除次数分布情况

5 结束语

为了提高 NAND 闪存文件系统在垃圾回收过程中的表现,提出了一种基于无效页年龄的垃圾回收算法 LPAGC. LPAGC 使用无效页序号计算无效页年龄以此得到物理块回收代价,同时综合考虑了回收效率和 NAND 闪存磨损均衡程度,实现了较好的平衡.使用逻辑序号和更新次数计算数据热度,避免了历史热度的权重问题.使用动态阈值对不同热度的数据分类,热度相近的数据写入到相同块中,实现了较好的数据冷热分离效果.实验表明,相较于主流垃圾回收算法,LPAGC 取得了更好的磨损均衡效果,同时垃圾回收的效率也得到了明显提升.

参考文献:

[1] ZHOU B, WAN S G, XIE C S. Isolation: Inexpensively separating cold data via garbage collection to improve the lifetime and performance of NAND flash SSDs[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience. DOI: 10.1002/cpe.5460.

[2] SEO S B, KIM W, KWON S J. Efficient page collection scheme for QLC NAND flash memory using cache [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2018, 9(11): 458-461.

[3] WU W, ZWAENEPOEL W. eNVy: a non-volatile main memory storage system[C]//Proceedings of the 4th Workshop on Workstation Operating Systems. Napa, CA, USA: IEEE, 1993: 86-97. DOI: 10.1109/WWOS.1993.348162.

594. DOI: 10.1007/978-3-030-00937-3_67.
- [10] GU Z W, CHENG J, FU H Z, et al. CE-Net: context encoder network for 2D medical image segmentation [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38 (10): 2281-2292. DOI: 10.1109/TMI.2019.2903562.
- [11] NI J J, WU J H, TONG J, et al. GC-Net: global context network for medical image segmentation [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2020 (190): 105121. DOI: 10.1016/j.cmpb.2019.105121.
- [12] FU H Z, CHENG J, XU Y W, et al. Joint optic disc and cup segmentation based on multi-label deep network and polar transformation[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37(7): 1597-1605. DOI: 10.1109/TMI.2018.2791488.
- [13] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(4): 834-848. DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2699184.
- [14] LI X, WANG W H, HU X L, et al. Selective kernel networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach, CA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00060.
- [15] LUONG M T, PHAM H, MANNING C D. Effective approaches to attention-based neural machine translation[C]//Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Lisbon Portugal: Association for Computational Linguistics, 2015: 11. DOI: 10.18653/v1/D15-1166.
- [16] BAHDANAU D, CHOKH, BENGIO Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations. San Diego, 2015.
- [17] STAAL J, ABRAMOFF M D, NIEMEIJER M, et al. Ridge-based vessel segmentation in color images of the retina[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2004, 23 (4): 501-509. DOI: 10.1109/TMI.2004.825627.
- [18] WU Y C, XIA Y, SONG Y, et al. Multiscale network followed network model for retinal vessel segmentation [C]//Proceedings of the 21st International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Granada, Spain: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-00934-2_14.

作者简介:

纪玲玉 女,(1993-),硕士研究生.研究方向为计算机视觉、图像处理. E-mail:jilingyu1993@163.com.

高永彬 男,(1988-),副教授,硕士生导师.研究方向为人工智能、计算机视觉、图像处理.

卫子然 男,(1982-),副教授,硕士生导师.研究方向为普外常见疾病、消化道肿瘤治疗.

(上接第 13 页)

- [4] KAWAGUCHI A, NISHIOKA S, MOTODA H. A flash-memory based file system[C]//Proceedings of the USENIX 1995 Technical Conference Proceedings. New Orleans: USENIX Association, 1995: 155-164.
- [5] CHIANG M L, CHANG R C. Cleaning policies in mobile computers using flash memory[J]. Journal of Systems and Software, 1999, 48(3): 213-231. DOI: 10.1016/S0164-1212(99)00059-X.
- [6] KWON O, KOH K, LEE J, et al. FeGC: An efficient garbage collection scheme for flash memory based storage systems[J]. Journal of Systems and Software, 2011, 84(9): 1507-1523. DOI: 10.1016/j.jss.2011.02.042.
- [7] YAN H, YAO Q. An efficient file-aware garbage collection algorithm for NAND flash-based consumer electronics[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2014, 60(4): 623-627. DOI: 10.1109/TCE.2014.7027335.
- [8] YAN H, HUANG Y, ZHOU X Z, et al. An efficient and non-time-sensitive file-aware garbage collection algorithm for NAND flash-based consumer electronics [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2019, 65(1): 73-79. DOI: 10.1109/TCE.2018.2885102.

作者简介:

柴柯珂 男,(1996-),硕士研究生.研究方向为模式识别与智能系统. E-mail:1836511704@qq.com.

严华 男,(1971-),博士,教授.研究方向为模式识别与智能系统.