

HybSim: 一种混合型流媒体存储的仿真系统

柴云鹏 杨楠

(中国人民大学数据工程与知识工程教育部重点实验室 北京 100872)

(中国人民大学信息学院 北京 100872)

摘要 高性能和低功耗的特点使闪存逐渐赢得广泛关注,而最常见的闪存使用方式是和内存、磁盘一起构成混合型存储系统,对于流媒体这样对存储容量和访问性能要求都非常高的应用来说尤其如此。但是,目前还缺少准确、全面的混合型存储仿真工具来支持混合存储的研究工作。首先,在对基于闪存缓存的混合存储的体系结构和能耗等关键问题进行建模的基础上,设计并实现了一套混合型流媒体存储的仿真系统 HybSim。相对于目前国际上广泛使用的存储仿真系统 DiskSim 及其闪存补丁,HybSim 增加了各类典型的混合型存储系统的实现、能耗模块、文件级管理和访问支持、流媒体服务模式支持,以及对性能、服务质量、能耗、设备磨损程度的统计模块等。基于 HybSim 对混合型流媒体存储系统在性能和节能两个方面进行了详细的仿真实验,并对几种典型的混合型存储系统体系结构在性能、服务质量、节能、设备磨损等方面的优劣进行了详细分析和比较。

关键词 闪存,混合存储,仿真,流媒体,节能

中图分类号 TP337 **文献标识码** A

HybSim: A Simulation System for the Hybrid Streaming Media Storage

CHAI Yun-peng YANG Nan

(Key Laboratory of Data Engineering and Knowledge Engineering, Renmin University of China, MOE, Beijing 100872, China)

(School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract The advantages of high-performance and low power consumption make flash to get more and more attention. The most common way of utilizing flash is constructing hybrid storage system together with RAM and disks, especially for streaming media application which has strict requirements on both storage capacity and performance. However, accurate and full-featured hybrid storage simulation tools are missing now. Firstly, this paper modeled the architectures and energy consumption of the hybrid storage systems, and then designed and implemented a hybrid storage simulation system—HybSim. Compared with the widely used storage simulation system—DiskSim and its flash patch, HybSim newly increases some new modules, including the implement of various kinds of hybrid storage architectures, power consumption, file-level management and accessing, streaming media service mode, and the statistics of performance, QoS, energy consumption and device wearing. Some detailed simulations on both the performance and energy conservation were made based on HybSim, and then we compared some typical architectures of hybrid storage on performance, Quality of Service(QoS), energy saving and device wearing.

Keywords Flash, Hybrid storage, Simulation, Streaming media, Energy saving

1 引言

近年来随着宽带网络的逐渐普及和 3G 等移动网络的迅速发展,流媒体应用已经成为 Internet 上一类非常重要的应用类型。中国互联网络信息中心于 2011 年 7 月发布的《中国互联网发展状况统计报告》^[1]指出,中国的网络音乐和网络视频的用户使用率分别高达 78.7%和 62.1%,用户数量分别达到 3.81 亿和 3.01 亿。在这种情况下,流媒体存储系统面临巨大的访问压力和存储压力,例如 YouTube 的视频年增长率为

123%,而 Facebook 的视频量每年增长高达 239%^[2]。因此,流媒体存储系统在提高访问性能和服务质量,以及降低能耗等方面都面临严峻的挑战。

传统的流媒体存储系统都采用以内存和磁盘为主的两级存储体系结构,但内存和磁盘在性能、容量和价格等方面的差距逐年加大,不利于系统整体性能的提升;而且内存和磁盘都属于高能耗的存储设备。随着存储容量的增大,流媒体存储系统在能耗方面的压力也非常大。近年来基于闪存的固态硬盘(Solid-State Disk, SSD)已经商业化生产并发展迅速,其性

收到日期:2011-11-30 返修日期:2012-03-06 本文受中国人民大学科学研究基金项目(中央高校基本科研业务费专项资金)资助。

柴云鹏(1983-),男,博士,讲师,主要研究方向为分布式计算、节能存储系统、流媒体存储系统,E-mail: ypchai@ruc.edu.cn; 杨楠(1962-),男,博士,副教授,主要研究方向为数据挖掘、flash 存储系统等。

能、容量和价格介于内存和磁盘之间,可以有效弥补二者之间的差距,而且 SSD 的能耗很低,在存储系统中加入 SSD 构成混合型存储系统可以有效降低整体的能耗。

但是,流媒体存储系统规模一般都非常大,在研究时要进行实验非常不便,而且测试时间也很长,这些因素都限制了这方面研究工作的开展。一套仿真系统能够实现准确、快速地对混合型流媒体存储系统进行仿真,将大大加速这个领域研究工作的进展。

本文介绍了我们设计和开发的一套混合型流媒体存储系统的仿真系统(Hybrid storage system Simulator, HybSim),并基于 HybSim 测试和分析了典型的混合型存储系统体系结构在性能、服务质量、能耗和设备磨损等方面的指标。无论是 HybSim 本身,还是测试分析的结果,对于混合型流媒体存储系统的优化和发展都具有推动作用。

2 相关工作

2.1 闪存

闪存(Flash)是一种可电擦除可编程的只读存储器(E²PROM),目前 SSD 中使用的主要是 NAND 型闪存。NAND 型闪存中读写的基本单位是 2kB 或 4kB 大小的页面,一个存储单元在写入之前必须先通过擦除操作清空,擦除的基本单位是包括几十至上百个页面的块。但闪存中每个存储单元的可擦除次数有限,只有 10,000~100,000 次^[3],之后就不能保障稳定工作,因此算法或体系结构对闪存设备磨损的影响是非常重要的一个指标。

闪存分为单层单元(Single-Level Cell, SLC)和多层单元(Multiple-Level Cell, MLC)两类。SLC 中 1 个基本的存储单元通过 2 种不同的电压值存储 1 个 bit,而 MLC 中 1 个存储单元可以区分 4~16 种电压来存储 2~4 个 bit。前者的性能更好,但造价也更高。闪存的访问性能介于内存和磁盘之间,能耗却比二者都要低很多。

2.2 存储系统仿真工具

在存储系统的仿真工具方面, DiskSim^[4]的影响和使用最为广泛。DiskSim 是由美国密西根大学和卡耐基-梅隆大学所开发的一套高效、准确及高可配置型的磁盘存储系统仿真工具。目前磁盘存储领域的很多研究工作都采用 DiskSim 或者将其进行扩充作为实验平台,因此它具有很高的可信性。

相对于磁盘来说,闪存的发展历史比较短,因此闪存的仿真工具并没有像 DiskSim 那样完善和公认的系统,目前有一定影响的闪存仿真系统包括微软研究院基于 DiskSim 4.0 开发的 SSD 补丁^[5],以及美国宾州州立大学开发的 FlashSim^[6]。在这二者之中,微软开发的系统由于仿真准确、可配置性较高,近年来被一些顶级会议和期刊上发表的论文所采用,影响最大。因此本文所介绍的混合存储仿真系统 HybSim 也是基于 DiskSim 4.0 以及微软研究院所开发的 SSD 补丁而设计和开发的。

3 HybSim 设计

HybSim 的定位是一款能够对包括内存、闪存和磁盘在内的混合型流媒体存储系统进行准确、高效仿真的仿真系统,

并可以对系统的性能、服务质量、能耗、设备耗损程度等方面进行详细而准确的统计。由于 HybSim 的基础 DiskSim 和微软研究院的 SSD 补丁已经实现了对磁盘和闪存 SSD 这两类设备的仿真计算,以及面向块的基本访问流程,因此 HybSim 的工作主要集中在各类典型的混合型存储系统的实现、内存、闪存和磁盘的能耗模块、文件级管理和访问支持、流媒体服务模式支持,以及性能、服务质量、能耗、设备耗损程度的统计模块等。

3.1 混合存储的体系结构

传统的存储系统由于只包括充当缓存的内存和充当存储的磁盘这两个部分,因此体系结构比较简单,如图 1(a)所示。但是闪存的加入使混合存储系统的体系结构更为复杂,出现了更多样的体系结构,如图 1(b)~(d)所示。

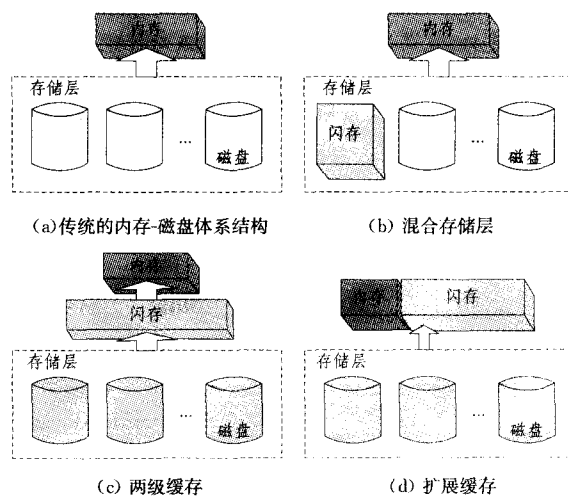


图 1 混合存储的体系结构

3.1.1 混合存储层体系结构

如图 1(b)所示,闪存 SSD 的读性能,尤其是随机读性能远远好于磁盘,因此在存储层用 SSD 替代一部分磁盘,可以提高整个存储系统的访问性能,并降低存储层的能耗。尤其是当应用可以确定一部分内容会被频繁访问时,将这部分内容存于 SSD 中,加速效果更为明显。例如, SUN 公司的 Solaris ZFS 文件系统支持使用 SSD 来存储文件系统和应用的一些元数据以及对访问延迟要求很高的数据^[7],以提高存储系统整体的性能。

3.1.2 两级缓存体系结构

在计算机系统结构中,使用多级缓存来加速是一个传统的方法,例如在内存之上有更快速的一级缓存和二级缓存。闪存 SSD 由于其性能、价格、容量都介于内存和磁盘之间,因此如图 1(c)所示,在内存和磁盘之间增加一些新的缓存层,即闪存缓存层,将非常有助于弥补内存和磁盘之间逐渐扩大的差距,提高系统的性能。而且,更加节能的闪存的引入,可以适当减少内存的容量,也能保证同样或更高的性能,而且能够降低系统的能耗^[8]。例如, Intel 公司提出的 Intel 加速存储器(Intel Turbo Memory, ITM)^[9]就是在存储层次中增加新的一层闪存缓存层来提高性能。

3.1.3 扩展缓存体系结构

另一种使用闪存的思路是将其作为传统内存的扩展。由于闪存设备的容量大、能耗低、性价比高,可以很方便地扩大

缓存的总体容量,提高缓存命中率和系统的性能,如图 1(d)所示。典型的系统是 SUN 公司的 Solaris ZFS 文件系统^[7],它会周期性地将在内存缓存队列末尾部分的内容转移到闪存中,这样闪存就相当于把内存淘汰的数据保存下来,整个缓存的规模明显扩大,有助于提高系统的性能。

3.2 能耗模型

由于存储规模增长迅速,存储系统的能耗也是不可忽视的一个重要指标,因此 HybSim 中按照磁盘、闪存和内存的能耗模型,设计并实现了三者的能耗管理和统计模块,它可以比较准确地给出不同体型结构和系统配置下的能耗值,对算法优化和系统设计都能提供有价值的参考。

3.2.1 磁盘的能耗模型

磁盘在工作中的能耗状态一般可分为 3 种:活跃、空闲和待机。在前两种状态下,磁盘都处于全速旋转中,能耗比较高,但活跃状态下除了盘片的旋转耗能以外,磁头的读、写和寻道操作也要消耗额外的能量,因此活跃状态的能耗高于空闲状态的能耗。而在待机状态下磁盘不旋转,所以功耗很低。但是磁盘的不旋转和全速旋转两种状态之间的切换需要消耗一定的时间和能量^[10]。总的来说,3 种状态下的功率关系为:

$$P_{\text{活跃}} \gg P_{\text{空闲}} \gg P_{\text{待机}} \quad (1)$$

如果希望降低磁盘能耗,那么要尽可能在磁盘没有访问的时间段内将其置于待机状态。但是如果当磁盘没有访问时立刻将其待机,那么磁盘会非常频繁地进行状态切换,这样不仅能耗会更高,而且会减少磁盘的寿命。因此一般是磁盘在一个固定的阈值时间段(例如 15s)内没有访问,才会转为待机状态。这个阈值一般设定为磁盘的收支平衡时间(Break-even Time, BT),即处于正常工作状态的磁盘在 BT 时间内的能耗应该和磁盘启停一次的能耗相等。在 HybSim 中,磁盘能耗的状态机模型及每种状态下触发的操作如图 2(a)所示。

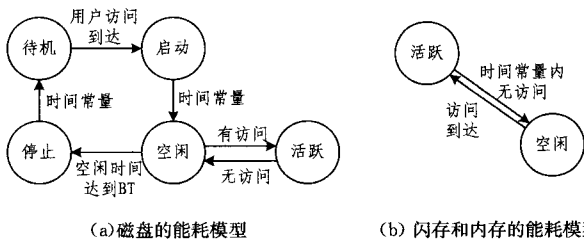


图 2 磁盘和闪存的能耗模型

3.2.2 闪存的能耗模型

闪存 SSD 的内部结构比较复杂,如图 3 所示。SSD 对外要对主机提供标准的块设备接口,内部要适应闪存芯片的特征,需要处理器、主存、控制器等多种部件管理内部的几个至几十个闪存芯片。因此 SSD 的能耗模型很复杂,不仅包括闪存芯片,还包括处理器、主存等器件的能耗,而且多个闪存芯片之间的并行读写程度、芯片擦除操作的多少等很多因素都会使整个 SSD 的能耗有很大的不同。在 SSD 的能耗建模方面虽然国际上已有一些研究,但都没有建立起详细的能耗模型,一般都是按照 SSD 厂商提供的资料进行简化建模,即将 SSD 分为工作和空闲两种状态。例如 Intel X-25E 64GB 的 SSD 工作时功率为 2.6W,空闲时功率为 0.06W^[11]。SSD 的

简化能耗模型如图 2(b)所示。

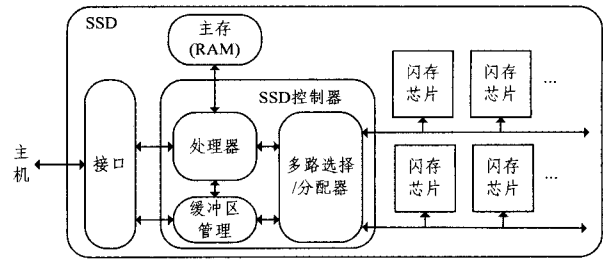


图 3 闪存 SSD 的内部结构

3.2.3 内存的能耗模型

内存的能耗模型和闪存类似,分为活跃和空闲两种状态,前者能耗较高,后者能耗很低。

3.3 其他模块

3.3.1 文件管理和文件访问接口

DiskSim 中对磁盘的访问是根据块设备号和逻辑地址进行的,并不支持文件级别的管理和访问,这对于很多应用来说很不方便。因此我们开发了文件管理模块,并对文件级访问接口进行支持,以便可以根据文件路径和文件内部偏移量进行访问。

3.3.2 流媒体工作模式

传统的存储服务在用户请求到达后将用户所需的内容一次性全部发送给请求者,但流媒体文件一般容量很大,而且用户播放过程随时可能提前退出,不再需要后面的数据。因此流媒体服务一般周期性地数据逐步发送给用户,保障用户可以流畅观看即可,这样既可以同时支持更多的用户在线观看,又能避免因用户提前退出而产生带宽浪费。所以流媒体的工作模式更为复杂,HybSim 对所有在线用户进行管理,并每秒向所有用户推送即将要播放的数据。

3.3.3 统计模块

作为一套仿真系统,HybSim 需要记录和统计仿真过程中的一些关键参数。除了一般的吞吐率、平均响应时间、缓存命中率等常见指标外,我们还要根据流媒体和闪存的特征做一些统计。

首先,对于流媒体服务系统来说,最重要的性能指标是服务质量(Quality of Service, QoS)。一般来说,流媒体应用的 QoS 具体包括启动延迟和抖动两个指标,前者指用户从发出请求到收到第一个有效数据包之间的延迟;而抖动反映了播放过程中的流畅程度。

其次,HybSim 统计了所有磁盘、SSD 和内存各自的能耗以及存储系统整体的能耗。

最后,由于闪存中每个存储单元的可擦除次数有限,因此体系结构或算法对闪存设备的磨损程度也是需要考的一个指标,所以 HybSim 可以统计所有 SSD 的总写入量,以及每一个可擦除块的擦除次数。

4 混合型流媒体存储系统测试

基于闪存的混合型流媒体存储系统是一种新兴的存储系统体系结构,但其性能和特性还不为人们所熟知,例如如何选择合适的混合存储体系结构,混合存储相对于传统内存-磁盘两级存储带来的性能提升有多少,以及是否引入新的挑战等。

而 HybSim 可以很准确、快捷、方便地进行仿真测试来回答这些问题。本文主要从性能和节能两个方面对混合型流媒体存储系统进行了详细的测试。

在实验中,HybSim 仿真典型的企业存储结点,默认配置为 8GB 的 Micron DDR3 SDRAM 内存,对于“两级缓存”和“扩展缓存”这两类以闪存为缓存的体系结构,系统采用 4 个 Intel X-25E 64GB SSD 和 10 个 512GB 的 Seagate Barracuda 7200RPM SATA 磁盘,而对于“混合存储层”这类以闪存为持久存储的体系结构,系统采用 4 个 Samsung 830 512GB SSD 和 6 个上述磁盘。

4.1 性能测试

在性能测试方面,传统存储体系结构和 3 类混合存储都配置 8GB 内存,测试闪存的引入带来的性能提升以及闪存设备磨损的程度(通过擦除次数观察)。在实验用的流媒体用户访问记录方面,我们选择了一组 CCTV 视频点播系统的实际流媒体环境下的 24 小时用户访问记录(视频平均长度为 188.65s,平均用户到达率为 10.8 用户/分钟)和一组 UUSEE 的 24 小时用户访问记录(视频平均长度为 1094.48s,平均用户到达率为 3.55 用户/分钟)^[12]。两类记录分别代表以短视频为主和以长视频为主的流媒体服务。

图 4 给出了 4 种体系结构分别在 CCTV VOD 和 UUSEE 两类流媒体用户记录下的内存和整体缓存命中率,实验中内存采用经典的 LRU 算法。在内存缓存命中率方面,前三者基本一致,而扩展缓存略有下降,原因是一部分热门内容进入闪存后内存不再存储,因此内存的缓存命中率有所下降;不过所有体系结构的内存缓存命中率都很低,原因是流媒体存储总容量很大(本实验中磁盘存储总量为 5TB),远远大于内存容量,很难保持高命中率。在整体缓存命中率方面,两类闪存缓存体系结构都获得了显著提高,主要原因是闪存容量较大,与磁盘存储量的差距明显缩小了;相对来说,两级缓存结构的整体命中率更高一些。

图 5 给出了服务质量方面的结果。在启动延迟方面,混合存储层结构由于用快速的 SSD 替代了一部分慢速磁盘,因此相对于传统结构有了一些改进,而扩展缓存和两级缓存的效果更好,原因是整体缓存命中率获得了显著的提升。在抖动方面,闪存缓存的两种结构的抖动更高一些,这是因为流媒体文件在存储时一般分为若干小块进行随机存储,这样用户访问一部分由内存/闪存这样的快速设备提供,另一部分由慢速的磁盘提供,因此播放过程的抖动会更大一些,不过存储层带来的抖动远远小于网络带来的抖动,因此在实际使用中闪存缓存的引入并不会带来明显的服务质量变化。

图 6 展示了两级缓存和扩展缓存这两种结构在 24 小时内的 SSD 写入量和平均每个块的擦除次数。实验结果表明扩展缓存虽然在性能指标上略低于两级缓存,但是写入量和擦除次数都远远小于后者,也就是对闪存设备的磨损更小,因此实际使用寿命更长。具体原因是扩展缓存采用了一种特殊的闪存缓存替换算法,每次批量地将内存缓存队列尾部的数据写入到闪存中,而且按照 FIFO 的方法进行数据替换,这样一方面可以通过写入周期的大小控制 SSD 的写入量,另一方面 SSD 总是采用整块写入、整块删除的工作模式,在垃圾回收时效率很高,擦除操作较少。

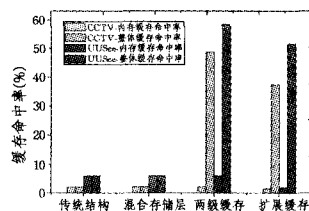


图 4 性能测试—缓存命中率

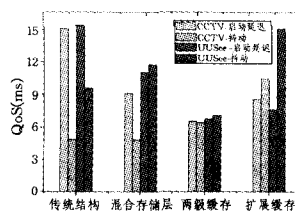


图 5 性能测试—QoS

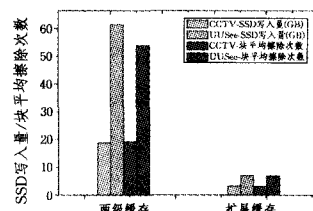


图 6 性能测试—闪存写入量和擦除次数

4.2 能耗测试

近年来流媒体存储系统的规模增长迅速,能耗很高,这也是低功率的闪存设备应用于流媒体存储系统的一大优势。闪存的引入,一方面可以减少高能耗的内存的容量,从而降低内存能耗,另一方面由于提高了缓存命中率,减少了磁盘的访问操作,因此减少了磁盘处于活跃状态的时间,减少了磁盘的能耗开销。而且闪存设备自身的能耗比较低,因此混合型存储系统比传统的存储系统应该更加节能。

本文对几种混合型存储系统在内存容量逐步减少的情况下的缓存命中率、服务质量和能耗进行了详细的测试和分析。在能耗测试中,我们采用 CCTV 视频点播系统的用户记录,仿真系统中用到的内存、闪存和磁盘的具体型号和各种状态下的功率值如表 1 所列。

表 1 存储设备的能耗参数

设备	状态	功率
Micron DDR3 SDRAM 内存(8GB)	活跃	0.3203W
	空闲	0.0609W
Intel X-25E SSD(64GB)	活跃	2.6W
	空闲	0.06W
Samsung 830 SSD(512GB)	活跃	0.127W
	空闲	0.078W
Seagate Barracuda 7200RPM SATA 磁盘(512GB)	活跃	6.19W
	空闲	4.6W
	待机	0.79W

图 7 给出了内存、闪存和整体缓存命中率的变化情况。对于两级缓存结构和扩展缓存结构,随着内存容量从 8GB 逐步减小为 4GB、2GB 和 1GB,内存缓存命中率逐步减小到很小的值,所以闪存缓存命中率和整体缓存命中率很接近。对于这两种命中率来说,内存减小均会导致其有所减小,但是影响很小,甚至可以忽略不计。所以,对于两级缓存和扩展缓存结构来说,内存的减少基本不会导致性能下降。

图 8 则给出了 QoS 中启动延迟和抖动的变化情况。前面由图 5 的结果分析可知,闪存缓存结构相对于传统结构会导致更小的启动延迟和更大的抖动。图 8 的结果也印证了这一规律,而且内存容量的减少对 QoS 的影响也非常小。

图 9 给出了传统结构、混合存储层结构、两级缓存结构和扩展缓存结构在 24 小时内的内存能耗、闪存能耗、磁盘能耗

scalable deep packet inspection with extended finite automata [A]//Proc. of SIGCOMM[C]. Seattle, USA; ACM Press, 2008; 207-218

- [7] Kumar S, Chandrasekaran B, Turner J, et al. Curing regular expressions matching algorithms from insomnia, amnesia and acalculia[A]// Proc. of ANCS[C]. Princeton, USA; ACM Press, 2007; 155-164
- [8] Bando M, Artan N S, Chao H J, et al. LaFA: Lookahead Finite Automata for Scalable Regular Expression Detection [A] // Proc. of ANCS[C]. Princeton, USA; ACM Press, 2009; 40-49
- [9] Bando M, Artan N S, Mehta N, et al. Hardware implementation for scalable lookahead regular expression detection[M]. RAW, 2010
- [10] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Stein, Introduction to Algorithms (Second Edition)[M]. The MIT Press, 2002

- [11] Carter J L, Wegman M N. Universal classes of hash functions (extended abstract)[M]. STOC, 1977; 106-112
- [12] Becchi M, Crowley P. Extending finite automata to efficiently match Perl-compatible regular expressions[A] // Proc. of the 2008 ACM CoNEXT Conference[C]. Madrid, ES; ACM Press, 2008; 73-81
- [13] 黄昆, 张大方, 谢高岗, 等. 一种面向深度数据包检测的紧凑型正则表达式匹配算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(2): 356-370
- [14] 于强, 霍红卫, 等. 一组提高存储效率的深度包检测算法[J]. 软件学报, 2011, 22(1): 149-163
- [15] Snort network intrusion detection system[EB/OL]. <http://www.snort.org>
- [16] NLANR. Index of/Traces/Traces/daily/20080801[EB/OL]. <http://pma.nlanr.net/Traces/Traces/daily/20080801>, 2008-12

(上接第4页)

和总能耗。首先,在几种存储设备中,闪存的能耗的确是最低的。其次,内存的能耗基本与其容量成正比,所以当两类闪存缓存结构采用更小的内存时,内存能耗部分下降得非常明显。第三,除了混合存储层由于用低能耗的闪存替换了部分磁盘导致磁盘能耗显著降低外,其余情况的磁盘能耗相差不大,闪存缓存结构的磁盘能耗比传统结构略低一点,这是因为减少了一部分磁盘访问操作,但是由于磁盘的活跃状态和空闲状态的功率相差不大,因此磁盘节能的效果并不显著。最后,基于闪存的混合存储系统的确明显降低了总能耗,尤其是采用较小的内存时。

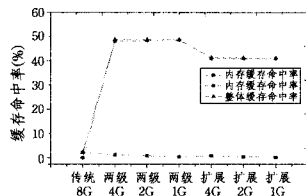


图7 节能测试—缓存命中率

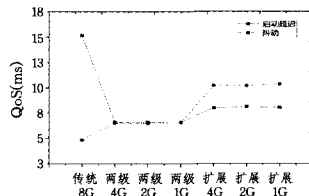


图8 节能测试—QoS

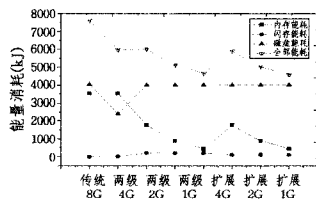


图9 节能测试—能耗

综合以上分析,混合型流媒体存储系统引入闪存、减少内存的方式在提升性能和降低能耗方面的效果是非常显著的,是一种具有很高实用性并值得推广的方案。在多种混合型存储体系结构中,混合缓存的体系结构无论是在性能、成本,还是节能方面都要优于混合存储层结构;混合缓存中,两级缓存的性能略好,但扩展缓存对闪存设备的磨损较少,实际使用寿命更长,而二者在节能方面的表现非常接近。

结束语 本文设计并实现了一种基于闪存的混合型流媒体存储系统的仿真工具,其可以对多种典型的混合型存储系统进行准确、高效的仿真,并全面采集性能、服务质量、能耗等多方面详细结果。通过性能测试和节能测试证明,混合型存储系统能显著提升系统性能,降低能耗。

参考文献

- [1] 中国互联网络信息中心. 中国互联网发展状况统计报告[EB/OL]. <http://www.cnnic.net.cn/dtygg/dtgg/201107/W020110719521725234632.pdf>, 2011-7
- [2] Yarow J. Videos on Youtube grew 123% year over year, while Facebook grew 239% [EB/OL]. <http://www.strangelove.com/blog/2010/06/videos-on-youtube-grew-123-year-over-year-while-facebook-grew-239>, 2010-06
- [3] Gal E, Toledo S. Algorithms and data structures for flash memories [J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(2): 138-163
- [4] Ganger G, Ganger G, Worthington B, et al. The DiskSim simulation environment (v4.0) [EB/OL]. <http://www.pdl.cmu.edu/DiskSim>, 2009-09
- [5] Agrawal N, Prabhakaran V, Wobber T, et al. Design tradeoffs for SSD performance[C]//Proc. USENIX 2008 Annual Technical Conf., 2008. Berkeley, CA, USA; USENIX Association, 2008; 57-70
- [6] Kim Y, Tauras B, Gupta A, et al. FlashSim: A Simulator for NAND Flash-based Solid-State Drives[C]//Proc. First Int'l Conf. on Advances in System Simulation, 2009. Porto; IEEE, 2009; 125-131
- [7] Bitar R. Deploying hybrid storage pools with Sun flash technology and the Solaris ZFS file system[EB/OL]. <http://wikis.sun.com/download/attachments/190326221/820-5881.pdf>, 2011-10
- [8] Kgil T, Roberts D, Mudge T. Improving NAND Flash Based Disk Cache[C]//Proc. of the 35th Annual Int'l Symp. on Computer Architecture (ISCA) 2008. Beijing, China, 2008; 327-338
- [9] Matthews J, Trika S, Hensgen D, et al. Intel® Turbo Memory: Nonvolatile Disk Caches in the Storage Hierarchy of Mainstream Computer Systems [J]. ACM Trans. Storage, 2008, 4(2): 24
- [10] Pinheiro E, Bianchini R. Energy Conservation Techniques for Disk Array-Based Servers[C]//Proc. 18th Int'l Conf. Supercomputing. New York, USA; ACM, 2004; 68-78
- [11] Intel. Intel® X25-E Extreme SATA Solid-State Drive[EB/OL]. <http://www.intel.com/design/flash/nand/extreme/index.htm>, 2011-11
- [12] Xiao X, Shi Y, Zhang Q, et al. Toward Systematical Data Scheduling for Layered Streaming in Peer-to-Peer Networks: Can We Go Farther? [J]. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(5): 685-697
- [13] 汪小梅, 朱华. 一种改进的小波变换阈值去噪法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(6): 48-51