在线视频点播系统节能方法与策略研究

芦建军 张 晓 赵晓南
(西北工业大学计算机学院 西安 710129)

摘 要 目前随着海量数据应用的快速发展,如何减少海量数据存储造成的巨大能耗成为研究热点。分析了在线视频点播的海量存储系统,根据正态分布分析视频访问的时间段,结合磁盘的特点提出一种基于视频点播的节能策略。策略中将磁盘的状态划分为不同的等级,降级时根据历史时间间隔调整时间窗口,同时根据视频的种类制定分布,以最终满足系统的性能和节能需求。根据计算,使用节能策略后系统平均节能达到44%。

关键词 视频点播,节能策略,海量存储
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Research on Method and Strategy of VOD Energy Saving

LU Jian-jun ZHANG Xiao ZHAO Xiao-nan
(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract Now with the rapid development of mass data application, how to reduce the huge energy consumption has become research focus. This paper analyzed the mass storage characteristics of online video on demand. It analyzed video access period according to normal distribution, and combining the characteristics of the disk technology, put forward a kind of energy-saving strategy based on VOD, in which the disk is modeled into different levels. When downgrading, time window is adjusted based on historical time interval, and distribution is formulated depending on the type of video system in order to ultimately meet the demand of the system's performance and energy conserving at the same time. According to the calculation, average energy saving reaches 44 percent after using energy saving strategy.

Keywords VOD, Energy-saving strategy, Mass storage

1 引言

当今时代是信息量爆炸式增长的时代,互联网每天产生的数据都非常惊人,在线视频点播网站也不例外。以优酷网为例,根据知名调研机构AC尼尔森公司的数据,优酷网每日视频播放量(VV, video view)在2007年12月就突破1亿,每日独立访问用户数量(UV, unique visitor)超过1200万。最新的数据是优酷网的VV已经达到1.5亿,峰值达到2亿;UV超过2500万,峰值达到3000万;日页面流量(PV, page view)峰值达到2.51亿,人均日访问时长70分钟。早在2010年优酷的视频资源就已经超过千万,而根据优酷CTO姚键介绍,优酷每年的数据增长率大概都在50%以上,可以推测优酷的视频资源数在4900万以上,按平均每部视频200MB计算,数据量接近10PB,而仅在北京数据中心的存储服务器数量就达2000台[1-4]。再如酷6网,酷6网的VV峰值达到2.88亿,PV峰值达到3.99亿,UV峰值达到5263万。根据酷6总裁刘文博透露,目前酷6网每天用户的平均上传视频量在10万左右,峰值时能达到20万,可以推测酷6的视频资源和数据量也非常大,未来还可能面临EB级的数据挑战[5,6]。

海量数据带来了一些问题:一方面这些海量数据需要大量的设备来存储,这些存储设备消耗的能源不容忽视。如果以平均500G容量的磁盘来推算,那么10PB的数据需要至少2万块磁盘,需要存储节点2000台左右,服务器磁盘的功率通常为10瓦左右,优酷使用的服务器主要是戴尔PowerEdge1950[2],服务器功率平均约193瓦[7],这些磁盘和服务器同时工作的电能消耗功率将分别达到200千瓦和386千瓦,仅一个小时就耗电586度。不仅如此,在数据中心存储设备消耗的电能产生的热量还会增加制冷系统的负担,而根据现有数据研究,存储设备电能约占整个数据中心的电能的30%[8],由此可以推算每小时消耗的电能为1950度。按照工业用电标准[9],假设每度电的价格为0.852元,粗略估算每小时电费上的支出约为1661元,可见海量数据带来了巨大的电费支出。另一方面,在非备份存储系统中80%的数据都是不会频繁读写的,这些数据的存储设备大部分时间都是闲置的,这就会造成极大的能源浪费。因此,节能技术的研究已经刻不容缓,目前环保、绿色的观念已经深入人心,能源消耗越来越受到人们的关注,存储行业也提出了绿色存储的概念,在数据存储中如何降低能耗成为研究热点。

本文以海量数据的典型应用即视频点播的节能技术为研

到稿日期:2013-05-27 返修日期:2013-07-22 本文受国家科技支撑计划课题(2011BAH04B05),西工大基础研究基金(JC20120209),国家863重大项目(2013AA01A215),自然科学基金重点项目(61033007)资助。

芦建军(1987—),男,硕士生,主要研究方向为网络存储,E-mail:lujianjun@mail.nwpu.edu.cn;张 晓 男,博士,副教授,主要研究方向为网络存储、网络软件、云计算;赵晓南 女,博士,主要研究方向为网络存储、网络软件、云计算。

究内容，分析了系统点播能耗相关的因素，比如磁盘的数量、负载的策略、用户的规模、用户行为等等，提出了一种与视频生命周期分布相关的节能策略，通过数据分析，短期内新增的能耗大幅减少，系统整体的节能效果明显。

2 相关研究

由于海量数据多是由大量磁盘构成的存储系统存储，因此降低活跃磁盘的个数、使非活跃磁盘处于低功耗状态成为减少能耗的主要途径。Li 等人提出了一种 EERAID 模型，即针对 RAID1 和 RAID5 通过在控制器层的 IO 调度和缓存管理来实现节能，对于特殊的负载最高达到 74%和 60%的节能效果[10]，之后他们还提出了一种基于 RAID1 的 eRAID，即通过停止部分或整个镜像磁盘组来降低能耗，平均节能达到 32%[11]。还有一种 PARAID 模型，根据负载变化调节活动磁盘的数目，在满足性能的情况下，最多节能 34%[12]。Zhu 等提出了一种 PB-LRU 模型，即通过管理分给每个磁盘的缓存，延长停止磁盘的时间来节能[13]。Eduardo Pinheiro 等提出了一种 PDC 模型，即通过迁移数据使热点数据集中在一起，剩下数据所在盘可以停止，从而节能[14]。还有一种 RIMAC 使用了两层缓存来重定向 IO，同时满足性能和节能[15]。Satoshi Hikida 提出了一种 RAPoSDA 模型，即在内存中增加主备份保证可靠性，通过块交换策略并动态控制基于磁盘状态的磁盘访问时间来节省能耗[16]。Zhu 等人提出了一种 Hibernator 模型，模型中使用可变速磁盘，动态决定磁盘转速设置，以及迁移数据达到负载平衡，最大节能 65%[17]。

MAID(massive array of idle disks)是只有处于活动状态的磁盘驱动器才会在某一特定时间内启动的一项存储技术，通过停止或降速不活动磁盘来节省能耗。现在 MAID 技术已经发展到 MAID2.0，不像 MAID1.0 磁盘只有开关两种状态，MAID2.0 有多种模式，增加了“盘片降速”。常见的 MAID2.0 等级有 3 个：第一级磁盘的磁头停靠；第二级除了磁头停靠，磁盘盘片降速 30%～50%；第三级磁头停靠，磁盘盘片停转，驱动器进入“轻度睡眠”[18]。MAID 技术能够通过对磁盘的控制达到节能的目标，而由于磁盘启动需要一定的时间，因此会带来性能上的影响，这影响了 MAID 的应用范围，决定了 MAID 在写请求很少的情形下最能降低能耗。

EERAID、eRAID、Hibernator、RIMAC 并没有分析负载的特征，MAID、PDC、PARAID 都只是简单地分析了负载的访问频率，并没有针对特定的应用总结出访问周期的内容，因此本文针对视频点播的特征，分析访问时间，提出一种新的节能策略。

3 系统分析

视频点播又称 VOD(Video on Demand)，是一种音视频媒体传输的典型应用，即根据用户的需要播放相应的视频节目。当今随着互联网的飞速发展，基于 IP 的 VOD 也开始广泛应用。视频点播的一个关键技术点就是海量存储，一方面由于每部影片通常都达到 1GB 以上，即使压缩格式以后也有上百 M，因此存储相当数目的影片就需要大量的存储设备；另一方面这些存储设备需要消耗大量的能耗，造成巨大的电费支出，这也越来越引起视频点播运营商的考虑。目前视频点播专门针对视频点播存储能耗方面的研究还比较少，主要的研究重点都在视频服务器的用户响应、并发性、视频质量等[19]，这里我们着重分析视频点播的存储和访问特征。通常视频点播系统具有视频文件大的特点，另一方面为了用户访问时保持流畅，通常需要缓冲处理，这需要一定的时间，另外视频本身具有时效性。

存储规模：视频点播的负载主要是视频文件的存储，假设视频文件大小平均为 C，视频的数量为 N，那么总存储量为 $N*C$。通常点播系统存储后端所采用的磁盘是一样的，假设磁盘的大小为 S，磁盘数量为 M，那么容量上至少要满足 $S*M>N*C$。视频点播服务器上的视频都采用了压缩编码技术，压缩编码技术与存储空间息息相关，例如如果采用 MPEG-2 则每小时视频占用空间 2.5GB，采用 DIVX 则每小时视频占用空间 300M。由于 MPEG-4 在存储容量、网络传输、图像质量等方面具有很大的优势，因此通常采用 MPEG-4 技术。2 小时的 MPEG-4 压缩后的视频文件通常不超过 296M，所以可以用 300M 的文件作为视频点播负载。

读写特征：对通常的视频点播而言，视频一旦完成上传通常不会修改，少数情况可能会由发布者或管理者删除，而视频被点播一段时间之后，就会很少有人再次观看。因此视频点播的读写请求具有一次写、很少读的特点。这样的读写特征很适合 MAID 技术的应用。

广告特点：作为盈利的手段之一，视频网站通常都在视频播放的开头播放一段广告，记这段广告时间为 Tad。有些网站视频的广告时间会有所差别，有些网站的视频广告时间是相同的，但这段用户等待的时间都是闲置的。在 MAID 系统中如果用户点播的视频刚好处于一块能耗降级的磁盘上，那么广告时间可以掩盖掉磁盘的启动时间，这样的特征也很适合 MAID 技术的应用。

视频访问：一部视频对于用户的访问通常是有以下规律的：因为视频文件要经过被用户知晓、大量点播、逐渐过时几个阶段，所以视频刚被上传的时候点击量是很小的，随着时间的增长，点击量越来越大。一段时间以后点击量逐渐下降，最后视频的访问量可能非常小[20]。因此可以使用数学的分布来描述视频的访问量，我们可以将一部视频从上传开始的时间 t 作为随机变量，那么前 $2T$ 时间段内 t 应该服从正态分布：$t\sim(T,u)(0<t<2T)$。其中 T 为从视频上传到视频访问量达到最大(也即此时视频被访问的概率最大)的时间，波动的平方记为 u。在 $2T$ 之后的时间 t 服从均匀分布。根据正态分布和均匀分布，t 的分布如图 1 所示。

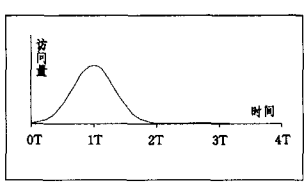

图 1 时间 t 的分布

这里 T 和 u 的取值和很多因素有关，我们可以将视频分类，通常视频网站是根据视频内容来分类，比如优酷分为电视剧、电影、综艺、音乐、动漫、拍客等，这里根据视频访问的发布特征和用户浏览的特征可以分为以下几类：

· 非常热的视频 A。这些视频在很长时间内处于访问量非常高的状态，可能持续几个月甚至一年，比如电影、电视剧以及一些娱乐音乐 MV，这些内容通常要经过流行期后访问量才会下降。

• 周期固定上传的视频类型 B。这些视频或者是制作者通常定期制作(比如游戏视频制作者、拍客等)并上传的或者是某些定期节目类(比如"非诚勿扰"等综艺类节目、体育节目等),关注这些内容的观众数目稳定,并且会在视频上传后很快点击,这些视频的访问量很快就达到最高峰,并且在下一部视频上传的时候,这部视频的访问量已经下降到很低,在以后的时间这些视频可能很少有人访问。

• 新闻资讯类 C。这些视频的访问量会在更快的时间内达到最大,通常当天的视频可能的访问量就达到最大,之后会迅速下降,一周以后很少有人再访问。

这 3 种视频的类别主要影响着 T 和 u 的取值,很容易理解 3 种类别视频的 T 和 u 是逐渐减小的。因为每个网站的采购视频的方向不同,所以每种类别所占的比例也不相同,比如优酷拥有大量的正版视频,而酷 6 则有大量的用户上传视频,第一类主要是版权视频,第二类是分享视频,新闻资讯类视频占的比例很小。但是总体上来看,根据《2010 年中国网民网络视频应用研究报告》,视频网站原创内容上传比例达到 45.4%,推测新闻资讯类可能占到 10%[21]。

4 节能模型与策略

存储系统通常的组成包括 IO 监控、磁盘调度策略、磁盘控制等模块,其中调度策略决定着节省能耗的多少。目前的调度策略的设定都将注意力集中在通过延迟写或者缓存读以及交换策略来将磁盘的停止时间延长,而没有结合具体的应用来分析。视频点播的应用中,具有明显的一次写、很少读的特点,同时通过上节的分析,我们知道可以利用广告的时间来掩盖磁盘启动的时间,因此视频点播应用可以很好地应用 MAID 技术。

MAID2.0 的三级模式:第一级有不低于 21% 的节能功效,保证响应时间小于 1s,第一个请求不会出现用电尖峰现象,随后的所有输入/输出请求都在瞬间得到处理;第二级第一个请求将在 15s 之内得到处理,随后的请求将瞬间得到处理,这一级有至少节能 38% 的功效;第三级第一个请求在 30s 之内响应,随后请求将瞬间得到处理,至少可以实现节能 56% 的功效[22,23]。MAID2.0 使得不同的数据可以有不同的磁盘模式,这样一方面可以保证应用程序的性能,另一方面可以充分发挥节能的优点。

根据 MAID2.0 假设,模型中的磁盘状态如下:

M_1:活跃状态,保证磁盘会在第一时间内响应读写请求。

M_2:读写磁头停下来,降低一定的功耗,磁盘能在 1s 内响应读写请求。

M_3:轻度睡眠状态,磁盘可以在 30s 内响应读写请求。

磁盘在这 3 种状态之间是可以相互转换的,磁盘通过在不同的时间段转换不同的状态达到节能的目的,磁盘的状态转换图如图 2 所示。

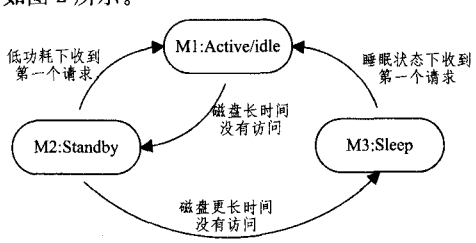

图 2 磁盘状态转换图

下面的分析将磁盘的状态在状态图中由高能耗状态转换到低能耗状态时称为磁盘降级,反之称为磁盘升级。我们先将模型简化,将每部视频看作一个磁盘。根据前面的分析,t 服从正态分布,由正态分布的概率模型可知,我们知道视频的访问量 99% 集中在 $(T-3u,T+3u)$ 这个时间段内,因此对于一部视频可以将其生命周期设置为 $(T-3u,T+3u)$ 和 $(0,T-3u)$、$(T+3u,2T)$ 和 $(2T,\cdots)$ 3 个时间段。这样我们可以制定如下节能策略:

1)在视频上传之后的一段时间即 $(0,T-3u)$ 内,视频还没有被认知,这个时间段如果在一定的时间内没有读写访问,使磁盘处于 M_2 状态。如果期间有任何的读写请求,则磁盘由 M_2 状态转换到 M_1 状态。由于磁盘由 M_2 状态转换到 M_1 状态非常快,性能几乎不受影响,因此在这一段时间将磁盘设置为 M_2 状态。

2)根据预测在时间段到达 $(T-3u,T+3u)$ 时,将磁盘一直处于 M_1 阶段,因为此时的读写可能会非常频繁,即使有某段时间停止了读写也有可能是暂时的,因为此时的视频的状态已经被认知,如果此时磁盘状态降级,不一定能起到节能作用,而且对于视频点播系统整体而言性能会受到很大影响。

3)在 $(T+3u,2T)$ 时间段视频已经过了火热阶段,但是仍有一定几率被访问,因此这个阶段和 $(0,T-3u)$ 的时间段是相似的,可以采取相同的措施。

4)在时间段 $(2T,\cdots)$ 视频处于很少有人访问的状态,此时磁盘一定时间内没有访问的时候可以将其状态设置为 M_3。同样如果这个时间段内视频被访问,磁盘的状态需要由 M_3 转换到 M_1,以便快速提供服务。

5)降级:在 1)、3)、4)的情形下都可能存在磁盘降级的过程,比如在 1)情形下,转换到 M_1 状态的磁盘很久没有请求访问,这时候可以考虑降级回到 M_2 状态。降级的过程非常重要,因为频繁启停磁盘对于节省能耗是不利的。因此根据历史访问,采用延长时间间隔的策略:

• 初始的时候设置 t_0 时间后降级,记录前两次磁盘状态升级的时间间隔 t_1 和下一次磁盘状态升级的时间间隔 t_2。

• 如果 $t_2 \leqslant t_1$,那么下次降级的时间就延长为 $2t_0$。

• 如果 $t_2 > t_1$,那么下次降级的时间缩短为 $1/2t_0$,但不能小于阈值 t_{min}。

• 以后每次磁盘降级的算法同上。

• 磁盘降级时 M_1 先到 M_2,然后才到 M_3。

这里采用历史时间间隔调整时间间隔窗口是为了避免一段时间内的集中访问导致的频繁磁盘启停。

6)广告:前面已经说明视频点播中的广告刚好可以掩盖磁盘启动所需要的时间。但是并不是每个被点播的视频启动都需要时间,因此广告的时间设置一方面要考虑磁盘的启动时间,另一方面需考虑运营商的要求。在 2)情形下不用考虑磁盘启动时间,1)、3)情形下磁盘响应时间是很快的,通常视频点播网站的广告时间都会超过 5s,则也不用考虑磁盘的启动时间。在 4)情形下:如果访问一个轻度睡眠的磁盘是需要时间的,则需要满足 $Tad > Tm_3$ (Tm_3 为磁盘在 M_3 状态转换到 M_2 状态过程需要的时间)。

采用这样的策略使得性能与能耗在视频不同的时间段内发挥不同的作用,在视频最需要性能的时候全面提供性能,在视频不再需要性能的时候最大化地节省能耗,尤其随着时间的增长,节省能耗的优势将非常明显。

上述分析的是将视频简化为磁盘的模型,具体化的过程

是相同类别的视频保存到一组磁盘上。这一组磁盘采取策略的 T 和 u 值是相同的，在策略中对视频的访问就转化为对磁盘的访问，具体策略的应用是不变的。设定磁盘 M_1、M_2、M_3 3 个状态对应的能耗分别为 Pm_1、Pm_2、Pm_3，磁盘从 M_3 转换到 M_2 的尖峰能耗记为 Pad，次数为 N。在 1)和 3)情形下磁盘由 M_2 状态变换到 M_1 和在 4)情形下由 M_3 变换到 M_1 状态以及由 M_1 状态变换到 M_2 状态停留的时间分别为 Tc_1、Tc_2、Tc_3，那么正态分布下的能耗模型为：

$W_1=t*Pm_2+Tc_1*(Pm_1-Pm_2)$ $(0<t<T-3u)$

$W_2=(T-3u)*Pm_2+Tc_1*(Pm_1-Pm_2)+(t-T+3u)*Pm_1$ $(T-3u<t<T+3u)$

$W_3=6u*Pm_1+(t-6u)*Pm_2+Tc_1*(Pm_1-Pm_2)$ $(T+3u<t<2T)$

$W_4=6u*Pm_1+2*[(T-3u)*Pm_2+Tc_1*(Pm_1-Pm_2)]+[(t-2T-N*Tad)*Pm_3+Tc_2*(Pm_1-Pm_3)+Tc_3*(Pm_2-Pm_3)]+N*Pad$ $(t>2T)$

最理想的情形转化为：

$W_1=t*Pm_2$ $(0<t<T-3u)$

$W_2=(T-3u)*Pm_2+(t-T+3u)*Pm_1$ $(T-3u<t<T+3u)$

$W_3=6u*Pm_1+(t-6u)*Pm_2$ $(T+3u<t<2T)$

$W_4=6u*Pm_1+2*[(T-3u)*Pm_2]+(t-2T)*pm_3$ $(t>2T)$

如果我们假设 $Pm_2=0.8Pm_1$，$Pm_3=0.44Pm_1$（根据 MAID2.0，实际也接近这个数值），那么

$W_1=Pm_1*0.8t$ $(0<t<T-3u)$

$W_2=Pm_1*(t-0.2T+0.6u)$ $(T-3u<t<T+3u)$

$W_3=Pm_1(0.8t-1.2u)$ $(T+3u<t<2T)$

$W_4=Pm_1(0.72T+0.44t+1.2u)$ $(t>2T)$

那么整个系统在 t 时间消耗的电量公式为：

$Q=C*t+(W_1+W_2+W_3+W_4)*t$

（C 为基础部分，如服务器的电量）

5 实验分析

依照前述分析，在一个存储容量为 10PB 的视频网站中 A、B、C 取 3 类视频的比例分别为 45%、45%、10%，对应的分布参数(T、u)分别为(30、6)、(8、2)、(2、0.4)，单位为天，每日上传量为 10 万部视频，每部平均 200M，每个硬盘容量为 500G，每度电价为 0.852 元。结合前面的分析，从计算之日起与没有采取策略的系统相比新增视频的电费支出对比随时间的变化如图 3 所示。

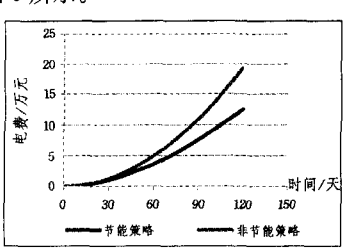

图 3 新增视频的能耗

对于整个系统而言，按照节能策略大部分的磁盘处于低功耗状态，节能将非常明显。从计算之日起，系统的电费支出对比随时间的变化如图 4 所示。

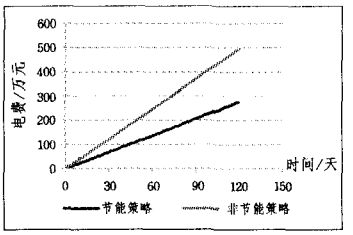

图 4 系统的总能耗

新增电费支出随着时间的推移，在前 4 个月节省的开支分别为：0.2281、1.3470、3.3733、6.7369(万元)，节能比分别为 18%、27%、31%、35%，使用节能策略后节省的支出随时间的推移越来越大，也就是节省的能耗越来越大，由于新增视频的电费支出相比整个系统只占很少的比例，因此对系统能耗的变化走势影响很小。在整个系统中，只有 20%的数据在使用，大多数的磁盘处于低功耗状态，可见对于整个系统而言，前 4 个月节省的开支为：53.8054、108.5015、164.1050、221.0458(万元)，节能均接近 44%，虽然比例基本固定，但是时间越长节能越大。

结束语 在提倡环保绿色的今天，降低存储系统能耗的技术显得尤为重要，从具体的应用来看，对特定的应用制定合适的策略更加有意义。本文通过分析应用的存储和访问特征，建立时间分布模型，从而制定合适的策略，对此节能策略下结果分析 4 个月的电费支出，对整个视频点播系统而言每个月平均节能 44%，节省电力开支逐渐增大，仅前 4 个月达 221.05 万元，节能效果是非常明显的。

参 考 文 献

[1] 优酷视频存储架构[EB/OL]. http://www.codesky.net/article/201003/118342.html,2013-05

[2] 优酷数据中心：要“优”不要“酷”[EB/OL]. http://www.cnw.com.cn/weekly/htm2011/20111228_239820.shtml,2013-05

[3] 优酷：分布式存储＋多点备份保证用户体验[EB/OL]. http://www.donews.com/net/201107/527005.shtm,2013-05

[4] 流量、用户双过亿 优酷倡导移动流量新标准[EB/OL]. http://net.chinabyte.com/42/12593042.shtml,2013-05

[5] 刘兴亮：酷 6 世界杯广告主居视频行业第一[EB/OL]. http://news.hexun.com/2010-07-26/124372992.html,2013-5

[6] 酷 6 新总裁刘文博：不会走花钱买视频的老路[EB/OL]. http://tech.china.com/news/11136338/20130409/17767956.html,2013-05

[7] All Published SPECpower_ssj2008 Results [EB/OL]. http://www.spec.org/power_ssj2008/results/res2008q1/power_ssj2008-20080212-00035.html,2013-05

[8] 重视数据中心能耗规划 提升电力能源利用率[EB/OL]. http://www.jifang360.com/news/2012824/n268939451.html,2013-5

[9] 江苏省电网销售电价表[EB/OL]. http://www.xishancity.gov.cn/zgxs/zwgkinfo/showinfo.aspx?infoid=eef1dd58-97b0-4f31-be6a-d5d8cfe8be79&categoryNum=046001005,2013-5

[10] Li Dong, Wang Jun. EERAID: energy-efficient redundant and inexpensive disk array[C]// The 11th ACM SIGOPS European Workshop. Leuven: ACM, 2004: 29

（下转第 140 页）

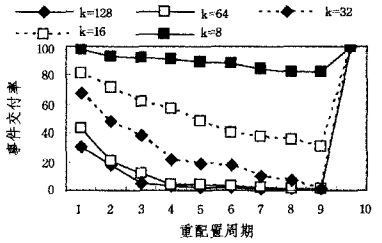

图 4　代理离开时的事件交付率

在一个重配置周期，k 个代理离开订阅分区，k 从 8 变化到 128，k 占订阅分区中代理的比例从 3%到 50%。从图 4 可以看出：当离开的代理所占比例较小时，有较高的 $Div(e)$，当没有代理离开时，又可保证事件的交付。这表明订阅表的重配置策略是可行的、高效的。

结束语　建立了在三维空间中订阅和事件在不同的分区中传播的 RS3DS 模型。提出了基于对应节点的订阅表重配置策略。仿真实验表明：RS3DS 具有低的重配置开销和高的事件交付率，提高了大规模动态 P/S 系统的重配置效率。

参 考 文 献

[1] Jafarpour H, Hore B, Mehrotra S, et al. CCD: Efficient customized content dissemination in distributed publish/subscribe[C]// Proceedings of the 10th ACM/IFIP/USENIX international conference on middleware. New York: Springer-Verlag, 2009: 62-82

[2] Tarkoma S. Dynamic content-based channels : meeting in the middle[C]// Proceedings of the 2nd international conference on distributed event-based systems. New York: ACM Press, 2008: 47-58

[3] Keeney J, Roblek D, Jones D, et al. Extending Siena to support more expressive and flexible subscriptions[C]// Proceedings of the 2nd international conference on distributed event-based systems. New York: ACM Press, 2008: 35-46

[4] Fotiou N, Trossen D, Polyzos G C. Illustrating a publish-subscribe internet architecture[J]. Telecommunication Systems, 2012, 51(4): 233-245

[5] Ahmed N, Linderman M, Bryant J. PAPaS: peer assisted publish and subscribe[C]// Proceedings of the 7th Workshop on Middleware for Next Generation Internet Computing. New York: ACM Press, 2012: 7

[6] Borsje J, Levering L, Frasincar F. Hermes: A semantic Web based news decision support system[C]// Proceedings of the 2008 ACM symposium on applied computing. New York: ACM Press, 2008: 16-20

[7] Middleware Systems Research Group at the University of Toronto. ToPSS-Toronto publish/subscribe system project[EB/OL]. http://www.eecg.toronto.edu/~jacob- sen/topss.html, 2009-11-2

[8] Tran D A, Pham C. Enabling content-based publish/subscribe services in cooperative P2P networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(11): 1739-1749

[9] Barazzutti R, Felber P, Fetzer C, et al. StreamHub: a massively parallel architecture for high-performance content-based publish/subscribe[C]// Proceedings of the 7th ACM international conference on Distributed event-based systems. New York: ACM Press, 2013: 63-74

[10] Baldoni R, Beraldi R, Quema V. TERA: topic-based event routing for peer-to-peer architectures[C]// Proceedings of the 2007 inaugural international conference on distributed event-based systems. New York: ACM Press, 2007: 2-13

[11] Pujol-Ahullo J, Garcia-Lopez P, Gomez-Skarmeta A F. Towards a lightweight content-based publish/subscribe services for peer-to-peer systems[J]. International Journal of Grid and Utility Computing, 2009, 1(3): 239-251

[12] Garcia-Sanchez A J, Garcia-Sanchez F, Pavon-Marino P, et al. An optimised publish/ subscribe middleware for peer-to-peer systems[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2008, 1(2): 195-215

[13] Zhu Y W, Hu Y M. Ferry: A P2P-based architecture for content-based publish/ subscribe services[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(5): 672-685

(上接第 119 页)

[11] Wang Jun, Zhu Hui-jun, Li Dong. eRAID: Conserving Energy in Conventional Disk-Based RAID System[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(3): 359-374

[12] Weddle C, Oldham M, Qian Jin, et al. PARAID: A gear-shifting power-aware raid [J]. ACM Trans. Storage, 2007, 3(3): 13

[13] ZhuQing-bo, ShankarA, ZhouYuan-yuan. PB-LRU: ASelf-Tuning Power Aware Storage Cache Replacement Algorithm for Conserving Disk Energy[C]// Proceedings of the 18th annual international conference on Supercomputing. Malo: ACM Press, 2004: 79-88

[14] Pinheiro E, Bianchini R. Energy Conservation Techniques for Disk Array-Based Servers[C]// 2004 International Conference on Supercomputing. Saint-Malo: Association for Computing Machinery, 2004: 68-78

[15] Yao Xiao-yu, Wang Jun. RIMAC: a novel redundancy-based hierarchical cache architecture for energy efficient, high performance storage systems [J]. SIGOPS Oper. Syst. Rev, 2006, 40 (4): 249-262

[16] Satoshi H, Hanh L H, Haruo Y. A power saving storage method that considers individual disk rotation[C]// DASFAA 2012. Busan: Springer Verlag, 2012: 138-149

[17] Zhu Qing-bo, Chen Zhi-feng, Tan Lin, et al. Hibernator: helping disk arrays sleep through the winter [J]. SIGOPS Oper. Syst. Rev. , 2005, 39(5): 177-190

[18] Colarelli D, Grunwald D. Massive arrays of idle disks for storage archives[C]// Proceedings of the 2002 ACM/IEEE conference on Supercomputing. Baltimore: IEEE Computer Society Press, 2002: 1-11

[19] 郝明哲. 视频点播系统关键技术研究[D]. 天津：天津大学，2006

[20] 胡乐尧，冯美禄，赵继梅. 多媒体文件点播频率的分析和预测[J]. 南阳师范学院学报，2007，6(6)：38-40

[21] 《2010 年中国网民网络视频应用研究报告》核心数据[EB/OL]. http://it.people.com.cn/GB/119390/118340/212787/212790/13763203.html, 2013-5

[22] 乐天，译. 用 MAID 2.0 降低存储费用[N]. 计算机世界，2009-01-12(037)

[23] Schulz G. MAID 2.0: Energy Savings without Performance Compromises [J]. the StorageIO Group, 2008