

## 内存云架构的磁盘节能策略

鲁亮<sup>1</sup>, 于炯<sup>1,2\*</sup>, 英昌甜<sup>1</sup>, 王政英<sup>1</sup>, 刘建矿<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 软件学院, 乌鲁木齐 830008)

(\*通信作者电子邮箱 yujiong@xju.edu.cn)

**摘要:**内存云(RAMCloud)的出现改善了在线数据密集型(OLDI)应用的用户体验,但其能耗高于传统的云数据中心。针对该问题,提出一种适用于该架构的磁盘节能策略。首先,引入遗传算法中适应度函数和轮盘赌法,尽量选择更为节能的磁盘进行数据持久化备份;其次,设定合理的服务器内存缓冲区来延长磁盘的平均连续空闲时间,使得部分服务器磁盘在空闲时进入待机状态。仿真实验结果表明,在50台服务器的内存云系统中,该策略能有效节能约12.69%;而缓冲区大小的设定对于节能效果和数据可用性具有双重影响,需权衡考虑。

**关键词:**在线数据密集型应用;内存云;磁盘节能;适应度函数;轮盘赌;待机

**中图分类号:** TP393.02 **文献标志码:** A

### Energy-efficient strategy for disks in RAMCloud

LU Liang<sup>1</sup>, YU Jiong<sup>1,2\*</sup>, YING Changtian<sup>1</sup>, WANG Zhengying<sup>1</sup>, LIU Jiankuang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China;

2. School of Software, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830008, China)

**Abstract:** The emergence of RAMCloud has improved user experience of Online Data-Intensive (OLDI) applications. However, its energy consumption is higher than traditional cloud data centers. An energy-efficient strategy for disks under this architecture was put forward to solve this problem. Firstly, the fitness function and roulette wheel selection which belong to genetic algorithm were introduced to choose those energy-saving disks to implement persistent data backup; secondly, reasonable buffer size was needed to extend average continuous idle time of disks, so that some of them could be put into standby during their idle time. The simulation experimental results show that the proposed strategy can effectively save energy by about 12.69% in a given RAMCloud system with 50 servers. The buffer size has double impacts on energy-saving effect and data availability, which must be weighed.

**Key words:** Online Data-Intensive (OLDI) application; RAMCloud; disk energy-efficient; fitness function; roulette wheel selection; standby

## 0 引言

近年来,在线数据密集型(On Line Data Intensive, OLDI)应用成为云计算研究中的热点话题。它们对于访问延迟和吞吐量等性能参数有很高的要求,如社交网络、信息检索和电子商务等<sup>[1]</sup>。在现有云计算平台下,虚拟化技术得以普及,CPU与内存性能优越,但网络带宽和磁盘I/O却成为制约OLDI应用发展的瓶颈<sup>[2]</sup>。以Amazon为例,每当其响应一个HTTP请求而生成一个HTML页面时,应用服务器会产生100~200个内部请求<sup>[3]</sup>。若延迟控制不好,将会在很大程度上影响用户体验。随着内存成本的不断降低和技术的不断成熟,内存云(RAMCloud)<sup>[4]</sup>的出现很好地解决了以上问题。它是由大量普通服务器的内存组成的一种新型数据中心存储系统,任何时刻的所有信息都存储在这些动态随机访问存储器(Dynamic Random Access Memory, DRAM)中,传统硬盘被内

存取代,而硬盘只作为备份。由于DRAM无可比拟的优越性,内存云可以提供比基于磁盘存储的系统高100~1000倍的吞吐量,而访问延迟仅为5~10 μs,相当于基于磁盘存储系统的1/1000~1/100。

内存云架构在处理OLDI应用中优势显著,但高能耗成为制约其发展的因素之一<sup>[4]</sup>。《“十二五”节能减排综合性工作方案》已明确指出要实施工业和信息产业能效提升计划,推动信息数据中心、通信机房和基站的节能改造<sup>[5]</sup>。且就世界范围而言,进行信息技术企业的节能改造刻不容缓。目前国内外关于能耗的研究很多,已有相当数量的文献从不同角度(如平台、粒度等)在能耗和功耗方面建模、测量、评估和优化等提出了各自的见解<sup>[6-8]</sup>。前人的研究方法和成果为进一步研究内存云下的节能策略提供了很好的参考价值,但并不完全适用于该架构,原因如下:

1)在内存云架构中,所有数据都存放于内存,每一台服

收稿日期:2014-03-07;修回日期:2014-04-13。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61262088,61063042);新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2011211A011)。

作者简介:鲁亮(1990-),男,湖南湘潭人,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:云计算、分布式计算;于炯(1964-),男,新疆乌鲁木齐人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:网络安全、网络与分布式计算;英昌甜(1989-),女,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要研究方向:网络调度算法、云计算;王政英(1984-),女,山西晋城人,硕士研究生,主要研究方向:软件项目管理、分布式计算、云计算;刘建矿(1990-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向:云计算资源调度。

服务器的内存空间得以充分利用。由于突破了磁盘读写速度慢、吞吐量小的瓶颈,所有的内存数据必将频繁访问,地址总线 and 数据总线负载高,CPU 也会因此以较高负荷运行。实施传统的 CPU 和内存的节能策略势必会大幅度降低性能,影响在线数据密集型应用下的用户体验,无法发挥出内存云架构的优势。

2)网络带宽的限制成为制约内存云架构推广应用的又一大瓶颈<sup>[4]</sup>。只有采用高性能交换机并不断加大带宽,才能逐步缩小与内存云所需网络资源的差距,而高性能的网络设备和高带宽又与绿色网络<sup>[8]</sup>形成了矛盾。

综上所述,内存云架构下的 CPU、内存和网络节能策略不宜实施。相反,磁盘只作备份而不响应用户请求,其性能的高低及所处的状态并不会影响用户体验。当且仅当某台服务器崩溃时,磁盘性能的高低才对数据恢复的速度有较大影响。但目前磁盘方面的节能策略研究仅针对单个磁盘、独立冗余磁盘阵列(Redundant Arrays of Independent Disks, RAID)以及传统云数据中心<sup>[9]</sup>,并不完全适用于内存云架构。因此,在内存云环境下研究磁盘节能策略,对于其未来低能耗趋势意义深远。

本文针对内存云架构下的高能耗问题,研究了其各子部件的组成及整体能耗模型,并在此基础上提出了一种适用于该架构的磁盘节能策略。实验结果表明,该策略在满足应用所需数据高可用性的前提下,能够达到节能的目的。

## 1 内存云架构

在 RAMCloud 中,每一台服务器既是用来响应用户请求的主服务器(Master),又是用来备份其他主服务器内存信息的备份服务器(Backup)。每一个 RAMCloud 集群拥有一个 Coordinator 节点,用来存储每一个文件的 Mapping 映射信息,即运用键值对保存用户所请求的信息在哪一台主服务器上,类似于 Hadoop 分布式文件系统(Hadoop Distributed File System, HDFS)中的 NameNode 节点<sup>[10]</sup>。其整体结构如图 1 所示。

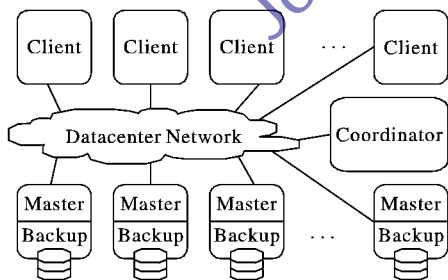


图1 内存云基本结构模型

由于保存在内存中的数据掉电易失,为了保证数据的可靠性,每一台主服务器中的信息需要随时存储到若干台备份服务器的磁盘中。这里采用基于日志结构的存储方式<sup>[11-12]</sup>,即先将主服务器内存信息的改动部分保存为日志,并切分成段(Segment),将每一段分别保存到不同备份服务器的内存缓冲区(Buffer)中,同时通过哈希表进行记录。此时备份服务器报告备份完成,主服务器继续执行其他指令,备份服务器继续接受其他主服务器向其请求的备份操作。待备份服务器的内存缓冲区满后,再使用批处理方式异步顺序传输到本地磁

盘。当某台主服务器崩溃,保存有该服务器日志信息的所有备份服务器就会并行运作进行数据恢复。这种方法不仅提高了文件写入的效率,也提高了系统崩溃恢复的速度。

## 2 内存云能耗模型

### 2.1 能耗的定义

能耗和功耗都可对系统能量消耗进行度量,但是它们的意义不同。功耗  $P$  是指计算机系统单位时间内的能量消耗,单位是瓦特(W);它与系统运行时间的乘积即为能耗  $E$ ,单位是焦耳(J)。其定义可用式(1)<sup>[8]</sup>表示:

$$E = \int_t^{t+\Delta t} P dt \quad (1)$$

由此可见,能耗反映了系统一段时间内总的能量消耗。由于系统功耗降低的同时可能会导致性能的降低,从而拖延任务的执行时间带来更高的能耗,因此一味地降低功耗并不可行。本文以能耗作为度量标准讨论节能问题。

### 2.2 系统能耗建模

对于内存云系统中的每一台服务器而言,其能耗由各系统子部件产生,包括空闲状态时的能耗以及 CPU、内存、磁盘和网络产生的能耗,可用式(2)表示:

$$E_{\text{server}} = E_{\text{idle}} + (E_{\text{CPU}} + E_{\text{RAM}} + E_{\text{disk}} + E_{\text{net}})_{\text{extra}} \quad (2)$$

需要注意的是,此处的  $E_{\text{CPU}}$ 、 $E_{\text{RAM}}$ 、 $E_{\text{disk}}$  和  $E_{\text{net}}$  均指服务器处于非空闲状态时,这些子部件额外消耗的能耗。其中每一个子部件的能耗均可通过一些方法进行评估。

### 2.3 磁盘能耗建模

对于任何一个机械硬盘而言,其工作状态可分为活动、空闲和待机三种状态,其转换关系如图 2 所示<sup>[9]</sup>。

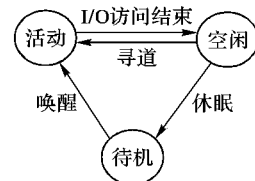


图2 磁盘工作状态转换图

当磁盘处于活动状态时,盘片高速旋转,磁头在磁头臂的带动下移动到相应柱面,此时功耗最大,性能最佳;当 I/O 访问结束,盘片旋转但磁头静止,磁盘处于空闲状态,功耗稍低;而当磁盘处于待机状态时,盘片停止旋转且磁头归位,此时功耗最小,但此时需要重新唤醒后才能响应 I/O 请求,对性能造成了较大影响。对于内存云系统而言,磁盘仅作为备份介质,理论上并不会造成服务延迟影响性能。但需要注意的是,磁盘唤醒过程中电机加速,磁盘的瞬时输入电流会达到活动状态的 2~3 倍,时间也需要 2~3 s<sup>[13]</sup>。如果一味地追求待机状态的低功耗很可能适得其反,必须加以权衡。

因此,需找到磁盘进入待机状态的临界值,即收支平衡时间,具体是指磁盘进入待机状态不会带来额外能耗的最短空闲时间间隔<sup>[14]</sup>。磁盘收支平衡时间  $t_{\text{BE}}$  可用式(3)表示:

$$t_{\text{BE}} = \frac{E_D + E_U - P_S(t_D + t_U)}{P_I - P_S} \quad (3)$$

其中: $E_D$ 、 $t_D$  分别为磁盘由空闲状态转换至待机状态过程中的能耗和时间, $E_U$ 、 $t_U$  分别为磁盘由待机状态转换至空闲状态过程中的能耗和时间, $P_I$ 、 $P_S$  分别为磁盘在空闲状态和待

机状态下的功耗。上述各参数可通过硬盘制造商提供的技术手册和用户实际测量获得,只有当磁盘连续的空闲时间大于 $t_{BE}$ 时转换至待机状态,才能抵消两次转换过程中的能量消耗,真正达到节能的目的。

### 3 内存云架构下的磁盘节能策略

在内存云架构中,备份服务器的选择往往是随机的<sup>[11]</sup>。实际上,不同服务器的硬件配置不同,其能耗参数也随之千差万别。结合第2章的相关讨论,本章将从磁盘节能角度出发,选择耗能更低的备份服务器磁盘进行日志信息的写入,从而减少高能耗磁盘的活动时间;在此基础上,利用内存缓冲区进行数据的延缓写入,使得部分服务器磁盘进入待机状态,以便最大限度降低能耗。

#### 3.1 备份服务器选择策略

当主服务器发出备份请求时,需将该段日志的所有副本保存到其他机架的服务器中,并且每一个副本也应当存储于不同的机架。这样是为了避免该机架顶部的交换机(top-of-rack switch)失效,或由于其他故障导致整个机架的服务器均不可用<sup>[11]</sup>。本文拟在每一个机架上设立一个Info节点,用于存储该机架上所有服务器磁盘的各项性能指标和能耗指标。当主服务器需要进行某段日志文件的备份时,先随机选择与该服务器所处机架相邻的机架(即与其连接在同一个交换机上的其他机架),然后由该机架的Info节点告知其最适合作为备份目标的服务器。如图3所示,该图中副本数为2, rack  $i$  为主服务器所处机架, rack  $i-1$  和 rack  $i+1$  为与之相邻的机架, master  $j$  为主服务器。

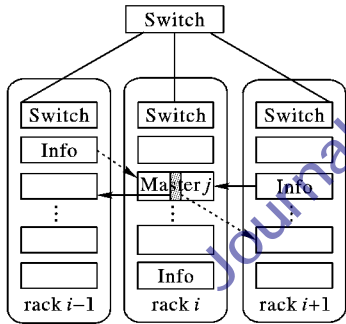


图3 备份服务器选择策略

设主服务器所处机架的上层交换机共连接了 $M$ 个机架,副本数为 $m$ ,则某一机架被选为备份目标的概率 $p_{\text{rack}}$ 可由式(4)表示。为了与功率 $P$ 区分,本文中用 $p$ 表示概率。

$$p_{\text{rack}} = m / (M - 1) \quad (4)$$

其中 $M-1$ 表示主服务器所处机架本身不予考虑。为了保证在同一机架中,活动状态下功耗越低的磁盘被选中的概率越大,在此引入与遗传算法类似的适应度函数和轮盘赌选择。适应度函数如式(5)所示:

$$f(d) = 1 / P_{\text{active}}(d) \quad (5)$$

其中: $d$ 为该机架中每一台服务器的编号, $P_{\text{active}}(d)$ 为各服务器磁盘活动状态下的功耗, $f(d)$ 为计算所得一群离散的适应值。继而采用轮盘赌选择,计算每个服务器中的磁盘被选中的概率,如式(6)所示:

$$p_{\text{disk}}(d) = f(d) / \sum_{i=1}^n f(i) \quad (6)$$

其中 $\sum_{i=1}^n f(i)$ 为该机架中所有服务器磁盘的累加适应度。

Info节点根据其自身存储的磁盘能耗参数执行上述算法,并将选择结果告知向该机架提出备份请求的主服务器。为了提高效率,Info节点不应等待备份请求到达时才执行选择算法,而应在缓冲区中维持一个长度为 $l$ 的备选备份服务器队列 $Q$ ,定义 $Q = (d_1, d_2, \dots, d_l, \dots, d_l)$ ,其中队列元素 $d_i$ 为第 $i$ 次选择执行的结果,即被选中的服务器编号。Info节点每执行一次选择算法,就将该被选中的服务器编号添加到该队列的末尾;每响应一次来自于其他机架的主服务器备份请求,就将队首元素发送给该主服务器,同时将其从队列中删除。若该备选备份服务器由于负载过高等原因拒绝备份,则Info节点继续将新的队首元素发送给主服务器,直到当前所选的备选备份服务器接受请求为止。如图3所示,Master  $j$ 欲将某段日志进行备份,虚线箭头表示被选中机架的Info节点将队首元素发送给Master  $j$ ,实线箭头表示Master  $j$ 执行选择并进行备份。

综上所述,当主服务器发出备份请求时,整个内存云系统中的每一台服务器(除去主服务器所处机架上的所有服务器)被选中的概率可表示为:

$$p_{\text{selected}}(d) = p_{\text{rack}} \times p_{\text{disk}}(d) = mf(d) / \left[ (M-1) \sum_{i=1}^n f(i) \right] \quad (7)$$

其中 $p_{\text{disk}}(d)$ 为在选中该服务器所处机架的前提下,选中这台服务器作为备份的条件概率,与式(6)表述意义一致。

#### 3.2 磁盘待机策略

备份服务器的选择确定之后,主服务器即可将所需备份的某段日志并行写入到若干台备份服务器的内存缓冲区中;待缓冲区满后,再通过一次写操作顺序传输到本地磁盘。这样可使得以往零散的磁盘空闲时间变得连续,从而令长时间空闲的磁盘进入待机状态。然而由于各服务器被选中的概率不同且各磁盘参数不一,不同磁盘的连续空闲时间将有所差异。本节主要讨论如何找到一种较为通用合理的方法来决定某一台服务器中的磁盘是否应当进入待机状态。

在内存云架构中,用户请求的所有信息都分布在各个主服务器内存中。假设主服务器平均每过时间 $T$ 就需添加一段新日志,段长度为 $L$ 。从备份服务器的角度出发,所需备份的副本来源于其相邻的任一机架,数量为 $M-1$ (由式(4)可得),每个机架的服务器数量为 $n$ 。设其被主服务器选中的概率为 $p$ ,缓冲区大小为 $B$ ,则编号为 $d$ 的备份服务器被访问的平均时间间隔为:

$$t_{\text{interval}}(d) = B / (L \cdot n \cdot (M-1) \cdot p_{\text{selected}}(d) / T) \quad (8)$$

其中 $p_{\text{selected}}(d)$ 由式(7)计算所得。假设从主服务器到备份服务器的传输时延为变量 $D$ ,那么每当主服务器进行一次备份时, $D$ 在同样的网络环境中差距很小,对于式(8)中平均时间间隔的影响可忽略不计。设 $v(d)$ 表示编号为 $d$ 的服务器中磁盘的内部数据传输率,则由式(7)、(8)可得磁盘的平均连续空闲时间:

$$t_1(d) = t_{\text{interval}}(d) - t_{\text{active}}(d) = \left[ B / (L \cdot n \cdot (M-1) \cdot p_{\text{selected}}(d) / T) \right] - [B / v(d)] = \left[ BT \sum_{i=1}^n f(i) / Lnmf(d) \right] - [B / v(d)] \quad (9)$$



将式(9)的结果与式(3)比较,当 $t_1 > t_{BE}$ 时,该磁盘进入待机状态;否则继续保持空闲状态。由此可分两种情况计算每台服务器的磁盘能耗,如式(10)所示:

$$E = \begin{cases} \sum P_A t_A + \sum P_I t_1, & t_1 \leq t_{BE} \\ \sum P_A t_A + [E_D + P_S(t_1 - t_D - t_U) + E_U], & t_1 > t_{BE} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $P_A$ 、 $t_A$ 分别表示一次写入请求中,磁盘在活动状态下的功耗和持续时间; $t_1$ 表示磁盘在完成一次写入请求后的连续空闲时间;其余参数的定义与式(3)相同。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验环境

为了证明上述理论的有效性,本文进行了一系列相关的模拟实验。表1展示了将10个不同能耗参数的磁盘分别安装在10台服务器中运行的具体情况。其中:“休眠能量”和“休眠时间”分别表示磁盘由空闲状态转换至待机状态过程中的能耗和时间;“唤醒能量”和“唤醒时间”分别表示磁盘由待机状态转换至空闲状态过程中的能耗和时间。这10台服务器同处于一个机架,且其他机架中服务器磁盘配置与之相同。

表1 磁盘能耗参数表<sup>[15-17]</sup>

服务器编号	磁盘标识	活动功率/W	空闲功率/W	待机功率/W	休眠能量/J	休眠时间/s	唤醒能量/J	唤醒时间/s	内部数据 传输率/(MB·s <sup>-1</sup> )
1	Seagate ST3500630AS	13.00	9.30	0.80	93.00	10.00	360.00	15.00	72
2	Seagate Cheetah ST39205LC	7.41	5.26	1.86	28.25	7.94	65.91	6.12	31
3	IBM Ultrastar 36Z15	13.50	10.20	2.50	13.00	1.50	135.00	10.90	55
4	IBM 731ZX	9.50	6.00	1.40	10.00	1.70	97.90	10.10	53
5	test1	10.10	7.30	1.80	31.00	4.90	85.00	8.10	70
6	test2	6.40	4.10	0.60	9.10	4.30	52.00	12.00	80
7	test3	15.20	10.70	1.60	48.00	6.30	264.00	14.00	105
8	test4	8.55	5.60	1.10	22.00	8.00	110.70	9.50	95
9	test5	11.20	7.80	0.96	19.00	2.70	181.00	7.90	100
10	test6	12.80	8.30	2.10	61.00	5.48	190.00	13.00	85

### 4.2 结果分析

在上述环境中安排以下实验:假设有5个表1所示机架连接在了同一个交换机上,即该集群中有50台服务器;主服务器平均每过10s就需添加一段新日志,段长度为8MB,副本数为3,备份服务器缓冲区大小默认为64MB;采用不同策略和不同缓冲区大小,分别进行实验1和实验2,并对结果进行分析。

#### 实验1 不同策略下的磁盘能耗对比

采用三种不同的策略选择备份服务器,运行1h后,可得出不同服务器中磁盘的能量消耗,如图4所示。其中:图例①表示主服务器随机选择备份服务器,且磁盘在空闲时不进入待机状态;图例②表示主服务器随机选择备份服务器,并执行磁盘待机策略;图例③表示采用备份服务器选择策略的同时,执行磁盘待机策略。

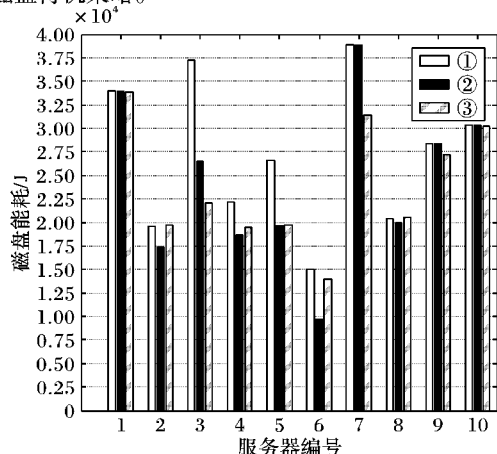


图4 采用节能策略前后的磁盘能耗对比

结果分析如下:

1) 图例②方法的执行结果与①相比,机架的整体能耗下降了10.63%;此时2、3、4、5、6、8号服务器磁盘在空闲时进入待机状态,其余服务器磁盘则由于不宜待机仍保持空闲。

2) 图例③方法的执行结果与①相比,节能约12.69%,与②相比节能约2.31%,能够更为有效地降低能耗;但由于备份服务器选择策略的执行,个别服务器的能耗会有升高的趋势,根据情况不同有如下两方面原因:

a) 采用该方法后,每台备份服务器被选中的概率不同,那么根据式(9)计算所得的磁盘平均连续空闲时间亦不相同,由此导致进入待机状态的磁盘所在服务器不同。经实验模拟,此时进入待机状态的磁盘所在服务器编号为3、4、5、6、7、9号,而当时采用图例②方法进入待机状态的2号和8号并没有进入待机状态,从而导致这两台服务器磁盘的能耗升高。

b) 由式(5)适应度函数的要求,活动状态下的磁盘功耗越低被选中的概率越大,则随着时间的推移,其能耗必然比随机选择的结果高。6号服务器尤其明显,4号服务器亦是如此。

综上所述,将本文提出的备份服务器选择策略和磁盘待机策略结合使用,并不适用于单机环境下的磁盘节能,但对于内存云架构而言整体节能效果显著。

实验2 不同缓冲区大小下的磁盘平均连续空闲时间对比。

使用本文提出的节能策略,通过改变每台备份服务器的内存缓冲区大小,其他参数保持不变,进行实验2。结合式(9)经实验模拟可得不同服务器的磁盘平均连续空闲时间 $t_1$ ,如图5所示。

由图5可知,当缓冲区大小调整为32 MB时,只有1台服务器磁盘可在空闲时进入待机状态;当缓冲区大小为64 MB时,有6台服务器磁盘可待机;当缓冲区大小调整为96 MB时,几乎所有服务器磁盘均有机会进入待机状态。故缓冲区设置过小将导致节能效果下降,缓冲区设置越大将会带来更为明显的节能效果。但由于内存中信息易失,大缓冲区必然会增加数据丢失的风险,在实际应用中需根据具体环境的不同设置合理的缓冲区大小,在满足 OLDI 应用所需数据高可用性的前提下达到节能的目的。

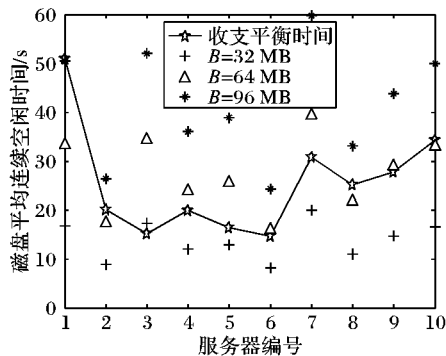


图5 不同缓冲区大小下的磁盘平均连续空闲时间对比

## 5 结语

内存云架构的出现为 OLDI 应用的进一步发展带来了新的契机,但在全球倡导低碳环保的大环境中,高能耗问题成为制约其发展的一大瓶颈。针对该问题,本文在研究内存云整体能耗模型的基础上,提出了一种针对磁盘的节能策略,即备份服务器选择策略与磁盘待机策略的结合。经实验论证,该策略能有效降低内存云架构整体能耗,为构建低能耗高性能的 OLDI 应用环境奠定了一定的理论基础。

下一步的研究工作包括以下几点:1) 磁盘节能策略的参数优化问题。文中所提及的大部分参数均可变,适应度函数不唯一,可根据实际负载情况动态调整为最适合的参数,以达到更好的节能效果。2) 其余系统子部件的节能问题。内存云架构的工作模型需进一步研究和探讨,CPU、内存以及网络通信等方面的高能耗问题仍有可能加以改善,如虚拟化技术的应用等。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Y, PENG Y, LI D. Survey on distributed storage for on line data intensive applications [J/OL]. [2013-03-26]. Sciencepaper Online, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201303-838>. (张一鸣,彭宇行,李东升. 面向在线数据密集型应用的分布式存储研究综述[J/OL]. [2013-03-26]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201303-838>.)
- [2] ARMBRUST M, FOX A, GRIFFITH R, et al. A view of cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 50-58.
- [3] DeCANDIA G, HASTORUN D, JAMPANI M, et al. Dynamo: Amazon's highly available key-value store [C]// Proceedings of the 21st ACM Symposium on Operating Systems Principles. New York: ACM, 2007, 7: 205-220.
- [4] OUSTERHOUT J, AGRAWAL P, ERICKSON D, et al. The case for RAMClouds: scalable high-performance storage entirely in DRAM [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2010, 43(4): 92-105.
- [5] General Office of the State Council. The comprehensive scheme of energy-saving and emission-reduction in "12th Five-Year Plan" [EB/OL]. [2011-09-07]. [http://www.gov.cn/zwggk/2011-09/07/content\\_1941731.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2011-09/07/content_1941731.htm). (国务院办公厅. "十二五"节能减排综合性工作方案[EB/OL]. [2011-09-07]. [http://www.gov.cn/zwggk/2011-09/07/content\\_1941731.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2011-09/07/content_1941731.htm).)
- [6] GUO M. Green computing: connotation and tendency[J]. Computer Engineering, 2010, 36(10): 1-7. (过敏意. 绿色计算: 内涵及趋势[J]. 计算机工程, 2010, 36(10): 1-7.)
- [7] QIAN Y, YU J, WANG W, et al. Energy saving and load balance strategy in cloud computing[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(12): 3326-3330. (钱育蓉, 于炯, 王卫源, 等. 云计算环境下软硬件节能和负载均衡策略[J]. 计算机应用, 2013, 33(12): 3326-3330.)
- [8] LIN C, TIAN Y, YAO M. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(4): 593-612. (林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4): 593-612.)
- [9] TIAN L, FENG D, YUE Y, et al. Survey on power-saving technologies for disk-based storage systems[J]. Computer Science, 2010, 37(9): 1-5. (田磊, 冯丹, 岳银亮, 等. 磁盘存储系统节能技术研究综述[J]. 计算机科学, 2010, 37(9): 1-5.)
- [10] SHVACHKO K, KUANG H, RADIA S, et al. The Hadoop distributed file system C[// Proceedings of the 2010 IEEE 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies. Piscataway: IEEE, 2010: 1-10.
- [11] ONGARO D, RUMBLE S M, STUTSMAN R, et al. Fast crash recovery in RAMCloud [C]// Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Operating Systems Principles. New York: ACM, 2011: 29-41.
- [12] ROSENBLUM M, OUSTERHOUT J K. The design and implementation of a log-structured file system [J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1992, 10(1): 26-52.
- [13] CARRERA E V, PINHEIRO E, BIANCHINI R. Conserving disk energy in network servers [C]// Proceedings of the 17th Annual International Conference on Supercomputing. New York: ACM, 2003: 86-97.
- [14] ZHU Q, DAVID F M, DEVARAJ C F, et al. Reducing energy consumption of disk storage using power-aware cache management [C]// Proceedings of the 10th International Conference on High-Performance Computer Architecture. Piscataway: IEEE, 2004: 118-129.
- [15] OTOO E, ROTEM D, TSAO S C. Workload-adaptive management of energy-smart disk storage systems [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Cluster Computing and Workshops. Piscataway: IEEE, 2009: 1-16.
- [16] SON S W, KANDEMIR M. Integrated data reorganization and disk mapping for reducing disk energy consumption [C]// Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid. Piscataway: IEEE, 2007: 557-564.
- [17] PINHEIRO E, BIANCHINI R. Energy conservation techniques for disk array-based servers [C]// Proceedings of the 18th Annual International Conference on Supercomputing. New York: ACM, 2004: 68-78.