

一种基于块级的存储性能优化方法

赵晓南 曾雷杰 李战怀

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

摘要 性能是存储管理系统中的一项重要内容,提高存储性能可以有效地降低系统的总体拥有成本(TCO)。数据迁移是性能优化的重要的组成部分,确定一个有效的模型,以决定迁移的对象和迁移的位置非常重要。提出一个量化的评价模型,与仅关心 IO 特性的热点检测系统不同,该模型考虑多方面的影响因素,评估磁盘中每个数据块的重要性,以此作为数据分类的依据。与其他模型最大的不同在于它是基于块级的,不考虑文件系统和上层应用程序,因此具有较好的性能。实验表明,该模型可以用于热点检测,指导数据迁移;有助于提高存储系统中存储设备的利用率。

关键词 性能优化,数据价值评价,分层存储,基于块级

中图分类号 TP302 **文献标识码** A

Method for Storage Performance Optimization at Block Level

ZHAO Xiao-nan ZENG Lei-jie LI Zhan-huai

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Performance is a key factor in storage management systems. To improve storage performance could reduce the TCO dramatically. As one of the most important elements in performance optimization, data migration needs a more reasonable model to decide what and where to migrate. A measurable method for evaluating the value of every data block in a disk was proposed. Comparing with the hotspots detecting system that focuses on IO characters, more factors were taken into consideration in this model. To establish the model at block level overlooking the file system and application, is the most obviously difference to other model, so it can help a storage system to achieve high performance. It can be concluded from the experiment that this method is helpful for the hotspots detection, to guide the data migration. In addition, it could also help to enhance the utilization of storage devices in the storage system.

Keywords Performance optimization, Data valuation, HSM, Block based

1 引言

存储网络和存储子系统结构的日益复杂化,导致存储管理的成本和复杂度不断升高,存储管理的费用在 TCO(Total Cost of Ownership)中的比例变得非常高^[1],而人工管理是其中的重要原因之一。因此,研究存储系统的自动化管理,尽量减少人为干预,优化系统性能,最大化发挥存储系统已有设备的存储能力是存储管理研究中的重要问题。现有方法主要是借鉴人工智能和数据挖掘等一些技术,结合存储系统的性能研究技术展开的,例如 IBM Almaden 研究中心的存储管理项目 SMART (Storage Management Analytics and Reasoning Technology), HP 公司的 AUTORAID 等。主要是采用基于规则的、基于模型的或者基于反馈的方法来实现存储系统的决策和自动化^[2]。

在存储系统管理的过程中,对系统工作情况进行一定时间的监视和分析之后,采取一定的方式进行数据迁移是性能优化必须的步骤之一。传统的方法中,主要是根据系统的 IO

情况,检测存储设备中的热点^[8],然后做数据迁移,从而平衡系统中各个子系统的负载。而在实际的应用系统中,由于存储设备存在性能上存在的差异(例如 ATA 盘和 SCSI 盘等)、某些非高频使用的数据却要求在访问时具有很高的响应速度等等原因,迁移的依据如果只单纯地考虑 LD 的 IO 频繁程度具有一定的局限性。

本文借鉴在 ILM(Information Lifecycle Management)研究中的数据价值评价,综合考虑几方面因素,采用对块级存储设备中的数据块的重要性进行评估、量化,作为数据迁移策略的依据,从而达到充分利用存储设备和负载均衡的目的,实现更合理的性能优化方案。

2 相关工作

在存储管理自动化研究中,卡内基梅隆大学的并行数据实验室(PDL)通过 self-* 系统的研究,做了很多工作^[3-5]。借鉴人工智能中的技术和控制系统中的控制理论,主要根据文件的属性来研究存储系统中的自我管理,自动调节和自动配置

到稿日期:2008-07-08 返修日期:2008-12-04 本文受国家自然科学基金项目:基于模式的高可扩展性 P2P 数据管理技术的研究(60573096)资助。

赵晓南 博士生,主要研究方向为海量数据存储、数据管理;曾雷杰 博士生,主要研究方向为海量数据存储、软件工程;李战怀 教授,博士,主要研究方向为数据库、数据挖掘、网络存储。

等问题。在性能预测方面也展开了很多研究工作^[2,6,7]。

目前,大多数的存储管理产品都提供了不中断系统中应用程序的在线迁移功能,例如 HP 公司的 LVM 和 Veritas 公司的 VxVM。马萨诸塞州立大学的研究者提出了一种在自我管理存储系统中自动检测热点的策略^[8,9],并运用一种名为带宽/空间比率(bandwidth-to-space ratio)的标准来重新配置存储系统,使之达到在迁移过程中的数据拷贝量最小。文献^[10,11]致力于研究如何减少迁移过程中的时间代价,而文献^[12,17]则是研究存储系统在重配置过程中,如何运用在控制系统常用的反馈方法来调节在线迁移的速度,从而保证这一过程对前台应用程序性能的影响最小。文献^[13]中引入了 evolution redundancy 的概念,目的是消除物理环境下的数据迁移操作。同时,还有研究者尝试用压缩的方法达到提高数据迁移速度的目的。然而,所有的这些研究都只是过分地关注迁移的速度问题,而忽略了方法的有效性和可行性。

IBM 公司 Almaden 研究中心的研究项目 Compliant Storage 和 Intelligent Data Storage 也致力于智能存储相关的研究,并提出了一种基于使用时间的文件级信息价值评价模型^[14],主要对数据使用时间进行考察;华中科大则是借鉴经济学中的商品价值规律,研究在 multi-grid 环境下基于文件级的数据价值模型,并提出了文件间相关性概念^[15],但是两者都不能直接应用块级存储设备的数据价值评价,而且也没有就操作的数据量和分布范围进行深入讨论。

3 数据重要性影响因素分析

数据在属性上存在各种差异,对用户的重要程度也各不相同,因此,有必要建立一个数据价值的评价模型,评估数据对用户的重要性,从而决定数据在存储系统中的存放位置以及向用户提供服务的级别(SOL)。当数据不再适合存储在当前的存储层次时,就要进行数据迁移。早期的数据价值评价研究采用直观方法,即依据数据对数据所有者的重要程度来决定。然而,实施、布署分层存储系统的技术人员由于缺乏对数据的行业知识,很难准确评估,需要第三方或用户自己提供这种价值的评估,而且只停留在应用级上。当数据量较大、数据种类繁多时(如涉及各种不同领域的的数据,具有多种相互无关的使用特性等),方法便会丧失可行性。本节将通过对比文件级的影响因素,讨论在块级存储管理系统中,哪些因素是计算数据价值时必须考虑的,而这个价值的评价结果,将作为数据迁移对象的判断标准。

第一,时间因素。数据在创建初期,通常具有更高的价值。例如电子邮件,在刚接收到时,因为其中很有可能记录着近期的工作计划,布置的任务及完成期限或者以附件形式提交的工作成果等,这些数据使用和引用的频率会非常高。一段时间以后,邮件的内容变陈旧,在工作中再次使用的可能性很小。因此,即使将这种数据保存到近线或是离线的存储层中,对整个存储系统性能产生的影响也不大。显然,评价数据的价值一定是其在某指定的时间段内进行的,时间段长短的选择很重要,过短,不能真实反映数据价值的变化情况,过长,则评价的代价增加,影响效率。

第二,数据的使用特性。是数据价值评价中最主要的因素。从业务服务器角度看,对数据的操作都是以文件为单位的,因此基于文件级评价数据价值更加简单、直观。对于文件

的使用特性可以归结为如下几类:1. 多用户使用。当某文件为多个用户共享使用时,必然较其专供单一用户使用具有更高的使用价值。因为,该文件的任何变更都将波及到众多用户的业务,访问性能的好坏与否、文件是否具有可用性,会影响到多个用户业务的进行。显然,这类文件的存储管理问题,较之单一用户文件更需要重视。2. 文件间的相关性。文件 A 的 IO 在一定时间段内发生符合某种规律的变化时,如果文件 B 也出现相应的 IO 变化或者呈现出某些特性,则说明文件 A、B 相关联,那么两者的价值变化也应具有关联性。3. 读写频率。读写操作是文件被使用的直接体现,读写频率高的文件必然具有更高的价值。4. IO 的范围和数量。数据在存储介质中,当发生 IO 操作时,如果涉及的范围更广,数据量更大时,相应的数据对象显然会更具价值。

由上述的分析可知,如果从文件级考察影响信息价值的因素,相对简单,因为大多数信息从文件元数据中即可获得。然而,对于数据中心所构建的存储网络(如 SAN 等),在做数据备份、恢复以及灾难恢复等管理数据策略时都是以块为基本单位的,在同一个数据块中通常会存在多个文件,无法做到对每个文件的属性和内容具体的关注。因此,要实现数据中心数据价值评价,必须从块级的观点出发。综合以上所述的因素分析,块级观点的数据价值评价需要考察如下几方面的参数:

1. 数据写频次。某数据块在指定时间段内的写操作次数。

2. 数据读频次。某数据块在指定时间段内的读操作次数。

一般情况下存储介质在读和写操作的代价上存在一定的差异,很可能两种介质在等量的读操作时性能相近,而在等量的写操作时会在性能上出现较大的差异。因此在评价数据价值时,将读写操作分开考虑,更有利于确切地估计出数据的价值。

3. 读/写粒度。与其他领域中的粒度概念有所不同,是指在固定大小的数据块中每次被操作(读或写)数据量所占的比例。平均读/写粒度,是在指定的时间段内各次操作的数据量比例的平均。

之所以引入读/写粒度,是因为不仅读写操作次数能够反映数据的重要性,读写操作的数据量同样反映着数据的重要程度,一般情况下,每次操作数据量占数据块容量比例越大(即该数据块的读写粒度较大),则该数据块对用户会具有更高的价值。

4. 数据分布。被操作数据在数据块上的位置分布情况。采用对数据块上一定时间段内各次操作的位置分布的统计值来衡量。

数据分布是块级观点所特有的参数。在数据价值评价粒度为文件时,数据分布将蜕变成统计各个确定的文件对象在一定时间段内的读写次数。读写频率较高的文件自然具有更高的价值,但是评价价值的粒度为块级时,单纯考察读写频率是不够的。例如,某数据块的读写频率很高,但每次读写对象分布的位置很少重叠,则这样的数据块价值应低于读写频率相同但每次读写对象分布重叠率较高的数据块。因为,这种分布较广的读写操作很有可能来自存储在同一个数据块上的不同文件,此时,尽管该数据块有较高的读写频率,但具体到各

个文件的操作却并不频繁,即使其存储介质的存效率不高,也不会对应用有较大的影响。

5. 块间相关性。与文件间的数据相关性类似,即某数据块以某种规律或特性被读写的一定时间段内,若另外的一个或几个数据块上也呈现出某种显著的读写规律或特性,则认为这些数据块之间存在相关性。

事实上,考察块间关联性,可以指导具有预测性的分层存储策略,通过对多个数据块之间相关性的评估,预测其所在的存储子系统整体的变化趋势,进而提前确定更准确的数据迁移对象和迁移的范围,避免反复迁移等系统振荡现象的发生,使基于 ILM 的存储管理具有更高的自主性和智能性。

以上各因素均视为正面作用于数据的价值。此外,数据丢失或出现错误可能造成的损失则视为负面作用于数据的价值。例如有些数据使用频率并不高,但是,这类数据一旦丢失,则可能对数据中心造成毁灭性的打击——大部分数据失效,而恢复此类数据却代价巨大。因此,必须将此类数据保存在稳定性最好的存储层级,以确保这部分数据的可用性。

4 定量模型及其计算

综合上一节对影响数据价值因素的分析,本节拟定一个对数据块的价值进行定量评价的模型。这里假定存储系统采用 RAID 技术实现硬件的冗余,并具有复制备份和远程灾难恢复功能,能够保证数据的完整性和正确性。因此,本次讨论的模型中暂不予考虑存储系统中负面作用的因素。

1. 价值评价模型

评价数据重要性是一定的时间段内的行为。如果用 t 表示当前时刻,则某个数据块的价值是由对指定时间区间 T 内的数据使用情况的评价, T 的取值区间为 $[t-N \times l, t]$ 。即将价值评价的时间区间 T 按照一定的规则等量划分为 N 段,每个时间段的时间长度为 l ,称为步长,而且在评价过程中是可调节的。

在给出价值模型之前,先对其涉及到的较复杂的参数及其计算方法加以介绍:

定义 1 块间相关系数,衡量两个数据块 d, j 之间的读写关联程度,用 RL_{dj} 表示。当数据块 d 在时间区间 T 上的任意第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个时间段内有(或没有)读写操作时,在数据块 j 上也有(或也没有)读写操作时,则视为数据块 j 与 d 相关。相关系数的计算方法同文献[15]中的文件间相关系数类似:如果用读写次数向量 $Q_a(q_{a1}, q_{a2}, \dots, q_{aN})$ 记录数据块 a 在时间区间 $[t-N \times l, t]$ 上的读写情况(其中 q_{ai} 表示在第 i 个时间段内的读写频次),则块间相关系数 RL_{dj} 可计算为:

$$RL_{dj} = \frac{Q_d \cdot Q_j}{|Q_d| |Q_j|} \quad (1)$$

$$\text{其中 } Q_d \cdot Q_j = \sum_{i=1}^N q_{di} q_{ji}, |Q_d| = \sqrt{\sum_{i=1}^N q_{di}^2}$$

于是,数据的价值模型如下:

$$V_i(d) = \frac{(1 + \sum_{j=1}^M RL_{dj})}{N} \sum_{i=1}^N [(\lambda_w W_i + \lambda_r R_i) \times P_i \times D_i] \quad (2)$$

$V_i(d)$ 表示数据块 d 在 t 时刻的价值。其中, W_i 和 R_i 分别表示在价值评价区间 $[t-N \times l, t]$ 的第 i 个时间段 $[t-i \times l, t-(i-1) \times l]$ 上的写操作频次和读操作频次; P_i 为第 i 个时间段上的平均读/写粒度; D_i 为第 i 个时间段上的数据分布;在

评价时间区间内,如果同一存储设备中有 M 个与 d 相关的数据块,则将所有的 M 个相关系数之和作为该数据块价值的一个评价因子。 λ_r 和 λ_w 分别是读补偿系数和写补偿系数,是用来表明存储设备在读写操作上的时间代价的比值。

2. 信息采集及参数计算

根据数据价值评价模型中的参数,可以确定需要采集的信息内容。本小节具体分析所要采集的信息,并讨论信息采集的方法以及具体的实现。在模型 $V_i(d)$ 中的主要参数有 W_i 和 R_i, P_i, D_i, RL_{dj} 等。其中

① W_i 和 R_i 代表读写频次,数据采集时,在每个时间段 i 中分别记录数据块的读次数和写次数即可。

② 读/写粒度,在本量化模型中以数据块上每次被访问的数据量占数据块容量的比例计算。而平均读写粒度 P_i 由在评价第 i 个时间段中各次读写粒度的均值衡量,由于读写次数即对应读、写频次之和,因此 P_i 需要采集的信息即可简化为记录在时间段 i 内被操作数据量之和。

③ 对于数据分布情况,关键问题是如何表示。这里采用位图的方式记录:将指定的数据块按地址划分为 $n \times m$ 的矩阵,对应 $n \times m$ 的位图,每一位代表一定长度的存储地址范围(大小取决于 m, n 的值以及数据块的大小)。每次对数据块进行操作时,对被读、写的对象所处位置在矩阵中相应的位置标记为“1”(如图 1 所示),最后将在时间段 i 中产生的所有位图按位或,得出 d_i ,计算时按位图中所有“1”的和的结果为 $1/D_i$ 的值。

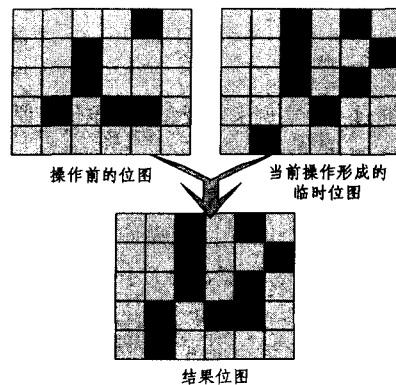


图 1 数据分布位图处理示意图

④ 虽然,两个数据块的相关系数是由读写次数向量计算,但判断两者是否需要计算相关系数的依据是在指定的时间区间内的各个时间段上是否具有相同的读写变化进行的。因此,需要在每个时间段中标记该期间读写操作的有无,进而在时间区间 T 上,每个数据块可获得一个 N 维操作标记向量 F ,若在任意的第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个时间段上有读/写操作就将该向量的第 i 维标记为 1,否则标记为 0,通过对数据块 d, j 各自对应的标记向量 F_d, F_j 按维做同或运算 $(F_d \odot F_j)$,当结果向量为全“1”时,则说明需要进一步求解相关系数。

5 运用迁移策略优化系统

在存储系统使用的过程中,数据迁移是优化存储性能的有效手段。根据前面讨论的块级数据价值评价模型,分层存储系统可以制定如下的迁移策略:

① 当有数据首次请求存储时,直接存入性能较高一级的存储介质(如 FC disk)中。

②按照事先设定的时间步长 l , 以逻辑磁盘 (LD) 为单位, 收集价值评价模型所需的参数信息。数据收集的对象, 仅限于已经投入使用的 LD。

③定期检查评价结果, 找出较高性能介质中存在价值低于设定阈值 W 的数据块时, 将这样的数据块向较低性能存储介质 (如 ATA disk) 迁移。

④对于低性能存储介质 (如 ATA disk) 中有读写的数据块同样以 LD 为单位, 收集参数信息, 持续进行价值评价。当其中最大价值数据块的价值超过其余数据块价值均值的 X 倍 (如 120%) 以上并且以高性能介质的读、写补偿系数评价所得价值不低于高性能介质中数据块的平均价值时, 将该数据块回迁到高性能存储介质中。

为保证基于块级价值评价的迁移策略能够实施, 几个关键问题需要解决。首先, 必须保证高、低性能的两种存储介质具有同样的信息采集步长 l 及评价时间区间 T , 并且 l 和 T 的取值, 需要具有自动调节的能力。其次, 迁移不能影响存储系统正常业务的进行, 既要保证实现在线迁移或是实现后台迁移, 又要保证迁移自身的效率, 这样迁移才具有实际意义。再次, 阈值 W 设定为一个小于所有同级存储介质中数据块价值的平均值, 如设为均值的 80% 等, W 还需具有根据系统的整体性能状况自动调节的特性。最后, 信息采集的历史数据都会保留, 同时, 所有数据块价值都是在当前时间点 t 向前的区间 T 上进行。

6 实验部分

本节将通过一个实例来验证和分析该价值评价模型的有效性。这个实例是 HP 实验室 1999 年收集的 cello99 [16] 的 IO trace, 这是对计算机系统的 IO 负载研究中常用的一个典型的 trace 集。在 23 个设备中, 选择了其中最活跃的一个, 其物理设备号为 0x1f068000, 磁盘的大小为 4G。实验是在该磁盘在 1999 年 4 月的 trace 信息上进行的。从 4 月 16 日的 trace 信息可以看出, 多数的块 (69%) 在一天之内几乎是 0 访问的, 大部分的 IO 访问 (75%) 集中在极少数的数据块上 (15%)。而且, 后面的实验结果表明, 该磁盘上数据块的价值变化非常明显。

为了方便采用 cello99 的 trace 文件进行数据块价值评估, 这里选择了磁盘中固有的 4M 大小的 PE/LE (物理块/逻辑块) 作为块, 并假设 (λ, λ_w) 为 (1, 1.2), (1, 2) 和 (1, 3) 3 种取值情况。对于模型计算所需要的其他参数, 则是通过 trace 文件采集或是计算得到的。而且, 在实验中并不采用在磁盘模拟器上重新运行 trace 文件的方法, 而是通过直接解析 trace 文件来收集和计算所需的参数。由于参数的获得方法比较简单, 这里不再作细致的说明。

本次实验通过 4 月 1 日到 30 日的 trace 文件, 来评估数据块在一个月内的价值变化模式。地址偏移量为 0x18400 的块 97, 偏移量为 0x58000 的块 352 以及偏移量为 0x74400 的块 465 是 3 个随机选取的块, 图 2 即标明了这 3 个数据块在一个月时间的价值变化情况。其中, 对于参数 (λ, λ_w) 分别取前述三组值的情况同时予以呈现。

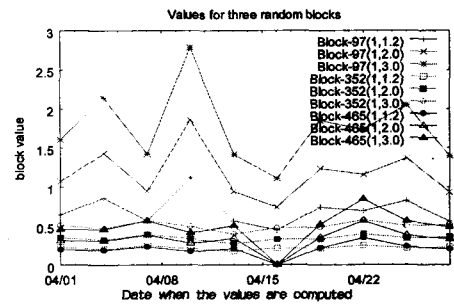


图 2 1 个月内的数据块价值 (Apr.)

为了更清楚地表示出该磁盘中的 1024 个数据块的价值信息, 实验中引入一个 32×32 的矩阵, 矩阵中每个单元代表一个数据块。图 3 表示的是读、写补偿系数分别为 1, 3 时的数据块在 4 月 16 日内的价值分布状况。其中大多数的数据块由于 0 访问而导致其在这个时间段上相应的数据块价值为零。大多数的 IO 访问集中在一小部分的数据块上, 因此这部分数据块的价值也明显的高于其他数据块。

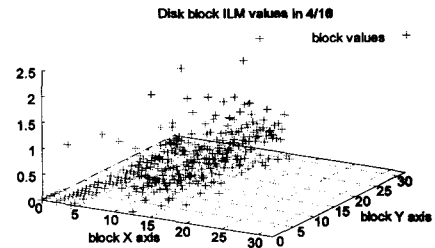


图 3 4 月 16 日的数据块价值

由模型可知, 数据块的价值同每次访问的 IO 数据量以及读写次数有着密切的联系。因此, 这里用图 4 来表示磁盘中各个数据块的 IO 数据量、读写次数特性和模式。从图像显示可以看到, 同一个磁盘中的数据块, 具有非常相似的特性和模式。

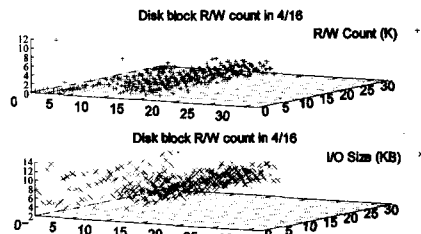


图 4 4 月 16 日磁盘块读写次数及 IO 数据量

结束语 在大型的存储系统中, 需要满足各个用户不同层次的需求。因此, 传统的数据迁移策略很难满足 SLO (Service Level Objectives) 的目标。本文在数据迁移策略中引入了一种新的模型, 通过评价磁盘中数据块的价值, 指导数据分类来解决这一问题。实验结果表明, 该方法在时间和空间的消耗上都是可以接受的。此外, 磁盘中的各个数据块的价值并不相同而且差异很大, 而对于每一个数据块本身的价值在一段时间内是相对稳定的。因此, 该模型可以用来指导数据迁移, 由于考虑了更多的影响因素, 该模型可以使存储资源利用率更高。在未来的工作中, 将对该模型中的数据分布参数进行更深入的讨论研究。

(下转第 137 页)

- splitting strategy for physical database design of multidimensional file organizations[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Very Large Data Bases, August 1997;416-425
- [4] Lee J H, et al. A physical database design method for multidimensional file organizations[R]. CS/TR-96-104. Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1996
- [5] Sam S L, Bishwaranjan B. Automated design of multidimensional clustering tables for relational databases[C]//Proceedings of the 30th VLDB Conference. Toronto, Canada, 2004
- [6] Padmanabhan S, Bhattarjee B, Malkemus T, et al. Multi-dimensional clustering: A new data layout scheme in DB2[C]//SIGMOD2003. San Diego, USA, 2003
- [7] Yu C T, Suen Cheing-mei, Lam K, et al. Adaptive record clustering[J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 1993, 10(2):180-204
- [8] Chang J, Fu K. Extended K-d tree database organization: A dynamic multiattribute clustering method[J]. IEEE Softw. Eng., 1981; 284-290
- [9] Robinson J T. The K-D-B-tree: a search structure for large multidimensional dynamic indexes[C]//Proceedings of the 1981 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Ann Arbor, Michigan, April 29-May 01, 1981
- [10] George A, Pothen A. An analysis of spectral envelope-reduction via quadratic assignment problems[J]. SIAM J. Matrix Anal. Appl., 1997, 18:706-732
- [11] Adolphson D, Hu T C. Optimal linear ordering[J]. SIAM journal on Applied Mathematics, 1973, 25(3):403-423
- [12] Diaz J, et al. Linear orderings of random geometric graphs[C]//Proceedings of the 25th International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science. Ascona, Switzerland, June 1999
- [13] Diaz J, Petit J, Serna M. A survey on graph layout problems[J]. ACM Comput. Surveys, 2002, 34(3):313-356
- [14] Petit J. Experiments on the minimum linear arrangement problem[J]. ACM J. Experimental Algorithmics, 2003(8)
- [15] Atkins J E, Bowman E G, Hendrickson B. A spectral algorithm for seriation and the consecutive ones problem, SIAM J. Computing, 1998, 28(1):297-310
- [16] Juvan M, Mohar B. Optimal linear labelings and eigenvalues of graphs[J]. Disc. Appl. Math., 1992, 36:153-168
- [17] Barnard S T, Pothen A, Simon H. A spectral algorithm for envelope reduction of sparse matrices[J]. Numerical Linear Algebra with Applications, 1993, 2(4):317-334
- [18] Helmberg C, Rendl F, Mohar B, et al. A spectral approach to bandwidth and separator problems in graphs[J]. Linear and Multilinear Algebra, 1995, 39(1/2):73-90

(上接第 132 页)

参 考 文 献

- [1] Childs S. Information Classification: The Cornerstone to Information Management [EB/OL]. 2006. http://www.snia.org/education/tutorials/2007/fall/data-management/SheilaChilds_Information_Classification.pdf
- [2] Li Yin, Uttamchandani S, Palmer J, et al. AutoLoop: Automated Action Selection in the Observe-Analyze-Act Loop of Storage Systems[C]//Proceeding of The 6th International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks (POLICY'05). Washington, DC: IEEE Computer Society, April 2005:129-138
- [3] Mesnier M, Thereska E, Ganger G R, et al. File classification in self-* storage systems[C]//Proceeding of the First International Conference on Autonomic Computing (ICAC-04). Washington, DC: IEEE Computer Society, May 2004:44-51
- [4] Ganger G R, John D S, Klosterman A J. Self-* Storage: Brick-based Storage with Automated Administration[R]. Carnegie Mellon University; CMU-CS-03-178, August 2003
- [5] Ellard D, Mesnier M, Thereska E, et al. Attribute-Based Prediction of File Properties[R]. Harvard Computer Science Group; TR-14-03. December 2003
- [6] Lin Qiao, Iyer B R, Agrawal D, et al. PulStore: Automated Storage Management with QoS Guarantee in Large-scale Virtualized Storage Systems[C] //Proceeding of IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC). Washington, DC: IEEE Computer Society, March 2005:302-303
- [7] Wang Mengzhi, Au K, Ailamaki A, et al. Storage Device Performance Prediction with CART Models[C]//Proceeding of the 12th MASCOTS Volendam. October 2004:588-595
- [8] Sundaram V, Shenoy P. Efficient Data Migration for Load Balancing Large-scale Storage Systems[R]. TR05-51. July 2005
- [9] Sundaram V, Wood T, Shenoy P. Efficient Data Migration in Self-managing Storage Systems[C]//Proceeding of Autonomic Computing. June 2006:297-300
- [10] Joseph H, Hartline J D, Karlin A R, et al. On algorithms for Efficient Data Migration [C] // Symposium on Discrete Algorithms. 2001:620-629
- [11] Khuller S, Kim Y, Wan Y. Algorithms for data migration with cloning[C]//ACM Symp. on Principles of Database Systems. 2003
- [12] Lu Chenyang, Alvarez G A, John W. Aqueduct: Online Data Migration with Performance Guarantees[C]//Proceedings of File and Storage Technologies '02, USENIX Association, January 2002:219-230
- [13] Li Huaiyang, Xie Changsheng, Cai Bin, et al. A New Technique for Eliminating Data Migration in Logistic Evolution Storage System[C]// Proceeding of the Fifth International Conference on Computer and Information Technology (CIT'05). 2005:327-333
- [14] Chen Ying. Information Valuation for Information Lifecycle management[C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Autonomic Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, June 2005:135-146
- [15] Xiong Muzhou, Jin Hai, Wu Song. Information Lifecycle Management in Multi-Gird Environment[C]//第十四届全国信息存储技术学术会议论文集. 北京:电子工业出版社, 2006:175-184
- [16] Maria E G, Santonja V. A New Approach in the Modeling and Generation of Synthetic Disk Workload[C]//Proceeding of 9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOT'00). Washington, DC: IEEE Computer Society, August 2000:199-206
- [17] 冯泳, 张延园. 数据迁移在 SAN 中性能优化的研究和应用[J]. 计算机工程, 2005, 31(7):43-45