

连续数据保护中的数据一致性保障技术研究综述

刘 林 熊 琦 吴世忠
(中国信息安全测评中心 北京 100085)

摘 要 连续数据保护是当前灾难恢复领域的新方向,它克服了传统数据备份和快照技术的缺陷,从新的角度对关键数据进行保护。首先对连续数据保护的工作过程进行了阐述,对其中存在的几类数据一致性问题进行了剖析,并结合当前国内外的连续数据保护技术中涉及的数据一致性保障措施进行了概括和归纳,分析其不足之处,并指出连续数据保护数据一致性保障技术的未来发展方向。

关键词 连续数据保护,数据一致性,数据灾难恢复

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Survey of Data Consistency Insurance Technologies for Continuous Data Protection

LIU Lin XIONG Qi WU Shi-zhong

(China Information Technology Security Evaluation Center, Beijing 100085, China)

Abstract As a new branch of disaster tolerance, Continuous Data Protection(CDP) overcomes the weakness of traditional data backup and snapshot technology, protecting critical data with novel method. The working flow of Continuous Data Protection was first introduced, then problems leading to data inconsistency in CDP were analyzed, and some technologies employed for data consistency protecting were summarized and analyzed. The future research direction in CDP data consistency protection was pointed out.

Keywords Continuous data protection, Data consistency, Data recovery in disaster

1 连续数据保护介绍

1.1 背景及相关技术比较

随着信息技术的不断进步,大型企业、政府机关和金融机构对业务和重要数据的依赖性不断增加,网络攻击和系统软硬件故障所导致的数据丢失和业务中断容易造成难以预料的损失,信息时代对数据和业务的保障引起了越来越多的关注。

作为提高关键应用可靠性和数据完整性的重要手段,基于备份的容灾技术由于较为成熟往往与快照、镜像等相关技术结合起来实施数据容灾项目。然而,传统数据备份技术主要通过数据的周期性备份来实现,不可避免会存在备份窗口的问题,窗口之间的数据修改往往容易丢失,不能满足企事业单位对关键数据的实时保护要求。

针对这一缺点,全球网络存储工业协会 SNIA^[1]提出了连续数据保护(Continuous Data Protection, CDP)的定义,连续数据保护是一种新的数据容灾方法,它可以捕获或跟踪数据的变化,并将其在生产数据之外独立存放,从而确保数据可以恢复到过去的任意时间点,提供比传统备份更细粒度的目标恢复点 RPO(Recovery Point Object)和更快的目标恢复时间 RTO(Recovery Time Object)。

在对数据的保护代价上,CDP 与快照技术^[2]等近似 CDP 技术不同。近似 CDP 技术往往通过频繁快照的方式来尽可

能捕获数据修改,由时间驱动,这种方法需要将快照周期设置足够小才能近似实现无遗漏数据获取,这会给系统带来巨大的负担。CDP 由数据修改的事件驱动,通过事件触发机制工作,在保证数据捕获精度的同时,也不会对系统的上层应用造成显著的影响。

在对数据的保护能力上,CDP 与 RAID^[3]、镜像^[4]等冗余备份技术也存在不同,后者数据读写操作均同步执行,因而只能保护最新的数据版本,如果数据版本错误没有被及时发现,那么保存的数据版本很可能不可用,而 CDP 能够回溯到故障以前的任意时间点数据版本,结合远程访问技术能够确保故障后数据的快速恢复。

1.2 连续数据保护的原理

SNIA 给出的 CDP 定义中只包含了功能与特点的描述,所以不同 CDP 系统的实现原理、技术细节也不尽相同,但一般来说,CDP 系统的组成部分及必要工作流程,可以表示为图 1。

首先,任意一个 CDP 系统都要选择一个参考数据版本。同时,由于参考数据版本要保存在异地,因而参考数据版本的建立环节也包含着网络传输环节。

其次,I/O 操作的捕获在 CDP 中也是必不可少的,因为 CDP 数据来自对磁盘 I/O 操作的捕获,即 CDP 数据生产。

最后,CDP 数据传输到异地后必须按照一定的格式进行

本文受国家自然科学基金重点项目(90818021)资助。

刘 林(1985-),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为灾难备份、网络安全;熊 琦(1983-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为灾难备份、网络安全;吴世忠(1962-),男,博士,研究员。

存储,并保存相应的索引信息以便检索,因此,数据处理、备份环节也是连续数据保护系统不可能缺少的部分。

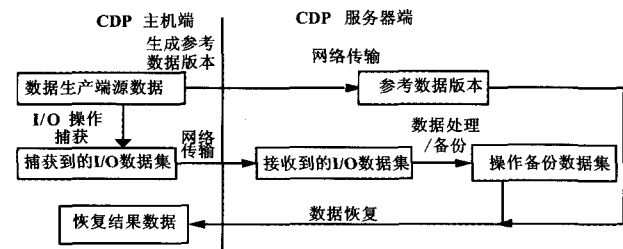


图1 CDP系统必要工作流程

此外,数据恢复功能作为CDP数据重组的过程也是CDP系统必不可少的工作流程之一。

2 连续数据保护中数据一致性

2.1 传统数据备份领域的的数据一致性定义

在传统数据备份容灾领域中,数据一致性可以分为以下两个方面:

(1)主从端数据一致性。用时间戳 $T_p(t)$ 和 $T_s(t)$ 分别代表主端系统(数据生产端)和从端(数据备份端)在时刻 t 的数据映像,如果在时刻 t ,存在 $t'(t' \leq t)$,使得 $T_p(t') = T_s(t)$,则主从端满足数据一致性。

(2)数据视图一致性。若该系统能保证应用程序对同一区域读到的数据都是最新的,则称该系统保持了数据视图一致性。

2.2 连续数据保护的数据一致性定义

CDP的原理完全不同于传统的数据容灾备份技术,因此连续数据保护中数据一致性的要求也与传统数据保护技术有所不同,而目前还没有专门针对CDP中数据一致性问题的研究成果出现,本文在对传统备份技术的数据一致性定义进行扩展,给出CDP的数据一致性定义。

由CDP的定义可知,CDP并不要求备份端时刻存在生产端的完整数据版本,只需要把数据生产端所有的I/O操作捕获并备份下来即可,因此两者之间在一致性定义上存在着一定的扩展,具体来说包括以下3方面内容。

(1)主从端数据一致性。设 $OP_p(t)$ 代表数据生产端在 $[t_0, t]$ 时间范围内发生的I/O操作的集合,用 $OP_s(t)$ 从端系统在 $[t_0, t]$ 时间范围内所备份下来的I/O操作的集合,若对于时刻 t 存在时刻 $t'(t' \leq t)$,有 $OP_p(t') = OP_s(t)$,则认为主从端满足CDP主从数据一致性。

(2)数据视图一致性。若某CDP系统在运行时能保证其他应用程序针对同一数据区域的多次读、写过程中数据都是一致的,即每次读到的数据是最新的数据,则称该CDP系统保持了CDP数据视图一致性。

(3)CDP数据恢复一致性:设 $T_p(t)$ 代表数据生产端在时刻 t 的数据映像,用 $Rst(t)$ 代表恢复目标时间点为 t 时得到的恢复结果,若 $T_p(t) = Rst(t)$,则该系统满足CDP数据恢复一致性。

最后,如果一个CDP系统同时满足属性(1)-(3),则称该系统满足CDP系统数据一致性。

2.3 连续数据保护的一致性威胁分析

2.3.1 主从端数据一致性的威胁分析

由2.2节知,CDP主从端数据一致性对参考数据版本和

操作备份数据集的正确性提出了要求,具体包括两方面的内容。

(1)参考数据版本的正确性

由图1可知,可能威胁参考数据版本正确性的因素包括生成参考数据版本的算法的正确性和网络传输的正确性。

生成参考数据版本的过程中必然存在备份窗口,在此期间,用户进程可能会对受保护的分区进行操作。如果在生成初始参考数据版本期间将用户进程的更新请求暂时挂起,则可能会影响到CDP数据视图一致性。如果在此期间让用户操作正常进行,则有可能使参考数据版本中包含了一部分被修改过的数据,从而影响参考数据版本的正确性。因此参考数据版本的生成算法必须能够保证所生成初始版本不含“脏数据”。

(2)I/O数据捕获集的正确性

操作备份数据集的正确性则依赖于更多的因素,具体包括I/O操作捕获的正确性、网络传输的正确性以及数据处理与备份的正确性。

I/O操作捕获的正确性是指,无论是在参考数据版本生成期间,还是在参考数据版本生成之后,系统进行CDP保护期间,捕获到的I/O操作数据必须是完备的,不能有遗漏、多余或错误。另外,在参考数据版本生成的同时,I/O操作捕获也要正常进行,即在参考数据版本生成阶段,I/O操作捕获流程与参考数据版本生成是同时进行的,二者的正确性都会影响到整个CDP系统的数据一致性。

数据处理与备份的正确性,要求CDP服务器对数据进行处理与存储时要保证数据能够正确备份。数据的处理可能包括操作日志的封装、数据的索引等,这些步骤的逻辑错误都有可能威胁操作备份数据集的正确性。另外,这些处理步骤之间的协同性也可能造成数据备份结果不正确。假设某CDP系统在服务器端的处理流程中包含日志处理与物理存储。如果在日志处理结束后,数据进行物理存储时返回结果为失败,而日志模块并没有进行回滚,此时无论 t' 为该操作执行前还是执行后, $OP_s(t)$ 都与 $OP_p(t')$ 不相等,必然不符合CDP主从端数据一致性。

网络传输的正确性主要是指CDP服务器端接收到的数据要与CDP主机端发送的数据相一致。网络传输可能出现的问题有很多,比如丢包、数据错误、多余的重传造成不正确的冗余数据、网络传输速度与CDP主机产生I/O操作数据的速度不协调而造成数据溢出,等。这些问题都可能造成备份数据集不符合CDP主从端数据一致性。另外,网络传输协议也应与CDP服务器端的处理模块相协同。如果CDP服务器端已收到某次I/O操作的内容并告知CDP主机端后,CDP主机端将此I/O操作的相应内容丢弃,之后CDP服务器端在存储此次操作的数据时处理失败,这时此次操作的信息已经完全丢失了,则此时CDP系统的状态不符合CDP主从端数据一致性。

2.3.2 数据视图的一致性威胁分析

根据2.2节知,数据视图一致性针对CDP系统对其他进程读写数据的影响程度提出了要求。由于CDP系统在工作时要监控用户和系统的I/O操作,捕获符合特定条件的操作数据,因而会对用户和系统的I/O操作产生一定的影响。

在参考数据版本生成阶段,CDP系统要保证得到的数据

不含有备份窗口期间新产生的“脏数据”。采取将 I/O 请求暂时挂起、等待备份窗口结束后再进行响应的方法,虽然既可以保证 CDP 主从端数据一致性,也可以保证 CDP 数据视图的一致性,但是对系统影响过大,因为在整个备份窗口期间,系统对受保护区域进行的 I/O 请求都是无法响应的。采取将 I/O 请求中的更新请求挂起、访问请求正常执行的方法,虽然可以保证得到的参考数据版本是正确的、符合 CDP 主从端数据一致性的,却影响了 CDP 数据视图的一致性。设想如下状况:

用 W_n 表示更新请求, R_n 代表访问请求,当这些请求以 $R_1, R_2, W_1, R_3, W_2 \dots$ 的顺序到来时, R_1 与 R_2 所访问到的数据是正确的, W_1 暂被挂起;这时, R_3 访问到的数据应为 W_1 执行后的数据,但实际上访问到的是 W_1 执行前的数据,数据视图一致性遭到破坏。

由以上分析可知,CDP 数据视图一致性的威胁主要来源于参考数据版本生成阶段对 I/O 请求的处理策略。

2.3.3 数据恢复一致性威胁分析

在 2.2 节中,CDP 数据恢复一致性仅对恢复结果提出了要求,但是,数据恢复结果是由恢复算法在参考数据版本与操作备份数据集的基础上计算得出的,如果参考数据版本与操作备份数据集不符合 CDP 主从端数据一致性,则恢复结果也很可能不符合 CDP 数据恢复一致性。所以 CDP 主从端数据一致性的威胁因素也都是 CDP 恢复数据一致性的威胁因素。另外,还有以下因素可能破坏 CDP 数据恢复一致性:恢复算法与恢复时间点目标(RPO)的选取。恢复算法对 CDP 数据恢复一致性的威胁是显而易见的。下面分析恢复目标时间点的选取对 CDP 数据恢复一致性的影响。

在文件系统中,一个应用级的操作可能分割成多个底层的操作。如果恢复目标时间点定为这两个操作之间的某个时间点,即使恢复结果与事实相吻合,但从语义上来说这种状态应该是不存在,所以不符合 CDP 数据恢复一致性的。

威胁 CDP 数据恢复一致性的因素包括(1)参考数据版本、操作备份数据集是否符合 CDP 主从端数据一致性;(2)恢复目标时间点的选取是否有意义;(3)恢复算法的正确性。

根据上述分析,整理得出连续数据保护各实施阶段同 3 种数据一致属性的映射关系如表 1 所列。

表 1 各威胁因素与 CDP 数据一致性之间的联系

CDP 标准工作流程 中阶段名称	CDP 数据一致性属性		
	数据视图	主从端	数据恢复
版本生成		✓	✓
I/O 操作捕获	✓	✓	✓
网络传输		✓	✓
服务器端数据处理、存储		✓	✓
恢复时间点选取			✓
数据恢复			✓

3 连续数据保护中数据一致性保障技术分析

CDP 一致性保障的目标就是针对 2.3 节所述的一致性威胁,确保 3 种数据一致性属性不会遭到破坏。

3.1 面向主从端数据一致性保障措施

理论上说,主从端的数据一致性要求连续数据的生产端和存储端的数据版本尽可能相同,然而由于网络带宽和磁盘读写速度受到限制,两边的数据版本往往存在一定的差异,这

就导致灾难恢复的时候存在数据丢失现象,针对这一问题,具有代表性的研究如下所述。

四川大学的李涛等^[5]提出了一种数据一致性检测方法和数据异地快速恢复方法,即通过引入数据冗余检测机制来减少恢复时的数据传输量,并结合差错重传和数据校验算法实现双端数据的正确性保障。该方法的实施有利于连续数据保护主从端数据一致性保障。

西北工业大学的李战怀等^[6]从数据冗余删除的角度出发,针对连续数据中存在的冗余现象进行识别和压缩,从而减少了网络传输的数据量,提高了主从端数据一致性。这种方法虽然从冗余数据压缩的角度提高了 CDP 系统的主从端数据一致性,但冗余数据的压缩必然导致管理机制的复杂,因此必须在此基础上优化连续数据的检索机制,保证其响应效率。

美国 Stony Brook 大学的 Tzi-cker Chiueh 等在文献[7]中提及可以通过调整数据传输的时间粒度来提高主从端数据一致性,如图 2 所示。

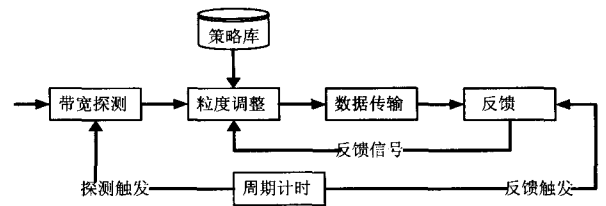


图 2 面向网络传输状况的自适应 CDP 粒度调整机制

其主要针对连续数据保护时间点冗余度高的特点,根据当前的网络带宽状况自适应选择所需要的数据传输粒度,从而在数据生产水平不变的前提下减少了需要传输的备份数据。该方法通过牺牲数据恢复时间点密度来实现对传输数据的精简,虽然提高了主从端数据一致性,却使 RPO 和 RTO 等指标降低。此外,它还提供了一种可调节的灾难备份机制,当传输粒度较大的时候,可以认为退化到传统备份技术,当传输粒度较密的时候又近似为连续数据保护,通过时间粒度的调节,不仅可以实现对主从端数据一致性的保障,还可以调节连续数据保护带来的系统和网络开销。

西北工业大学的王泽林等^[8]在对基于 Windows 平台的远程数据容灾系统(RDDT)的研究工作中,将数据一致性作为衡量容灾系统的关键因素。为防止主端和备份端的数据不一致,提出了保持两端数据卷上数据块更新顺序的方法来保持两端的数据一致性,并通过一种改进型流水线策略,在保证数据视图一致性的同时优化了系统性能。最后还探讨了解决多设备数据一致性的方法。该研究通过比较同步和异步这两种复制模式,得出数据不一致状况只出现于异步复制模式下这一结论。同时通过在主从端数据发送接收过程中使用原子操作,防止因网络中断而导致的数据重复发送接收;在操作日志的控制信息区域内采用多个位图来记录操作请求,防止因日志区域写满而导致的溢出。该研究为远程数据容灾系统的数据一致性提供了可靠的解决方案,并为 CDP 中的数据一致性保护问题提供了重要参考。

3.2 面向数据视图一致性保障措施

数据视图一致性保障威胁主要存在于参考数据版本生成阶段对数据 I/O 操作的处理机制上。针对这一问题,不同学者提出了不同的方案。

Michail D. Flouris 在文献[9]提出,在开始拷贝之前对备份对象做一个快照,保存该时刻的一个完整状态;然后,拷贝线程开始拷贝,此时是针对快照来拷贝。对于读操作,按照正常的读来进行;对于所有的写操作,都实现双向分发。对于标记的块先缓存到另外一个卷中。当拷贝线程结束时,数据的初始一致性已经满足。这时候启动传输线程,开始把缓存中的数据依次发送到存储端,连续数据保护已经开始运行。此时初始版本是时间快照时刻的一个镜像。

Ta-Shma 等人在文献[10]中提出使用拷贝线程直接依次拷贝文件,对于打开的文件,就采用打开文件备份^[11]的方式打开,然后拷贝数据。在这种情况下,对于读操作,依然不改变。对于写操作,仅对已经拷贝完成的文件截获,二次分发。对于还没有拷贝的文件或正在拷贝的文件,不二次分发,使其按照原有的方式处理。当拷贝线程结束的时候,初始化的工作就完成。

这两种方法各有优缺点,前者的缺点是缓冲的数据量可能非常大,但在构建过程中的时间粒度均可得到一致性保存;后者的缺点是可能会导致没有一个满足一致性的版本,但是可以建立一个拷贝结束的时候的一致性版本。其方法为在拷贝结束的版本基础上,重做此时间点之前的所有操作。它的优点是基本不需要缓冲数据,处理效率比较高。

选择哪种方法来实施初始版本构建阶段的一致性保障取决于对于一致性保障的要求和初始版本的构建环境,如果初始版本的构建方式比较可靠、对版本构建阶段的恢复粒度不做要求,则可以选择后者,否则在牺牲缓存容量的情况下选择前者比较可靠。

3.3 面向数据恢复一致性的保障措施

数据恢复一致性威胁的其中一个因素在于恢复时间点的选择。恢复时间点的选择是否有意义,决定了相应恢复结果的可用性。文件系统的多个操作在下层会被分解为多个子操作,恢复到其中的某个时间点没有意义。这就要求在获取连续数据保护数据的时对备份数据进行语义标记,从而在恢复时能够正确选择有意义的时间点进行恢复操作,因此语义标记的嵌入和识别成为保障数据恢复一致性的关键因素,如图3所示。

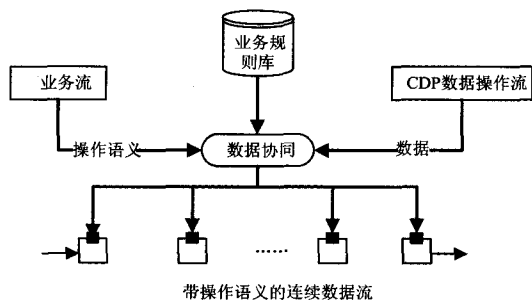


图3 连续数据保护语义标记

华中科技大学的谢长生等人^[12]在研究现有连续数据保护机制的基础上,面向分布式存储环境设计了一种将分布式文件系统元数据管理机制与连续数据保护元数据管理机制结合起来的文件系统,它扩展了传统的元数据组织结构,实现了连续数据保护元数据管理的融合,在数据捕获的同时保存了描述操作的元数据,结合元数据管理机制实现了可用数据恢复时间点的有效选择,同时支持文件视图的快速浏览策略。

该技术通过分布式系统的语义化管理来实现对恢复数据一致性视图的保障,因为给连续数据保护操作管理员呈现的是有意义的操作对象和恢复点,所以不会产生恢复点无意义的情况。从本质上来说,这种方法的出发点是为了提高分布式环境下数据视图浏览的反应速度,但却为连续数据保护的恢复视图一致性保障提供了应用思路。

清华大学的鞠大鹏^[13,14]等人阐述了应用语义同连续数据保护一致性检查点之间的关系,提出了通过分析特殊 I/O 操作的一致性检查点插入算法。所提出的 3 种一致性检查点插入方法不仅能够提供任意时间点的数据视图,还可以根据用户的定义提供周期性的快照备份。

该技术通过一些外部的输入信息或流程,例如用户界面活动或者命令行信息,来指定重要的应用恢复点,具有良好的可扩充性。

此外,武汉大学的陈珉^[15]等通过内置应用感知来自动探测并记录最近连贯事件的信息,如检查点或执行交易等,该技术被用在数据库备份操作中,实现数据库数据一致性保障。

结束语 CDP 的数据一致性在多个阶段均存在相应的威胁,考虑到目前网络传输均具备差错控制机制,在假定连续数据保护算法在设计上不存在功能性缺陷的前提下,分别针对 CDP 主从端一致性、数据视图一致性和恢复一致性保障技术 3 个方面对国内外相关研究方向进行了探讨,涉及到语义标记技术、应用感知技术和传输优化及冗余数据删除等方面的关键技术。这些技术的出发点虽然不是为一致性保障设计,但从外在表现上均对一致性属性的保障提供了支持,并且各自具有相应的优势和使用场景。

连续数据保护是继传统备份技术后在数据容灾领域的新方向,针对连续数据保护的设计和实现方面虽然取得了一些进展,但在数据一致性保障措施上并没有形成相应的共识,这一方面是因为应用场景的差异,另一方面也是因为目前数据一致性保障技术尚不成熟,或多或少还存在着一些缺陷,这也限制其进一步应用。只有针对连续数据保护的的实际应用场景选择具体的一致性保障措施,并且某些情况下需要根据业务的一致性保障需求,在权衡效率和代价的情况下综合应用多种技术手段,才能更好地保障系统的应用服务。

在将来的研究中,连续数据保护将朝着扩大保护范畴、提高数据恢复粒度和完善数据存档机制的方向发展,这就为数据一致性保障技术提出了新的要求。一致性保障机制归根结底是一种基于状态感知技术的自适应机制,必然会带来一定的系统开销,并且也会导致系统运行过程的复杂化,状态感知的延迟和误差也会对系统的运行状况造成影响。如何优化其工作流程,克服现有弊病,也是下一步需要解决的问题。

参考文献

- [1] SNIA. Storage Network Industry Association[EB/OL]. <http://www.snia.org/>, 2008-09-30
- [2] Sankaran A, Guinn K, Nguyen D. Volume Shadow Copy Service [EB/OL]. <http://www.microsoft.com>
- [3] Patterson D A, et al. A case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID) [C]//Proc. 1988 ACM SIGMOD Intl. Conf. on Management of Data (SIGMOD '88). New York, NY, 1988
- [4] Strachan M D, et al. Novel technologies for large deformable mirrors[Z]. San Diego, CA, United states: SPIE

(下转第 132 页)

用户的簇属预测成功率在70%~80%,即,使用簇指纹在一定程度上解决了协同过滤中的冷启动问题,效果较好。

结束语 针对移动互联网信息过量的问题,本文提出了一种基于用户网络结构的信息过滤机制。该机制引入基于资源流行度的用户网络兴趣簇结构、簇指纹和用户网络社交结构,为协同过滤中的用户相似性度量提供新的维度,为信息过滤机制中的冷启动问题提供新的解决思路。数据分析显示,该机制对信息过滤的准确度有一定程度的提高。

该机制将用户网络结构作为信息过滤机制的一个信息过滤节点,协助识别用户的信息需求以提供更恰当的服务。可以看到,此时的用户已经不仅仅是服务的消费者和使用者,同时也是服务内容的提供者。用户的行为、计算能力和社会关系被开发以提高服务质量。用户网络结构作为信息过滤机制的一部分,帮助整合各种资源,精确地提取信息,识别移动互联网用户的需求并提供更多有趣的服务。不同于将机器网络和用户网络区分对待,而是研究它们之间的交互作用,这是一项有意义的尝试。

参 考 文 献

- [1] Su Xiao-yuan, Taghi M K. A survey of collaborative filtering Techniques[J]. *Advances in Artificial Intelligene*, 2009, 9:1-20
- [2] Lieberman H. Letizia: An Agent That Assists Web Browsing [C]//*Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI-95)*. San Mateo,CA; Morgan Kaufmann publishers Inc,1995:924-929
- [3] Michael J P, Jack M, Daniel B. Syskill&Webert: Identifying interesting Web sites[C]//*Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence*. Portland,OR,US,1996:54-61
- [4] Giles C L, Bollacker K D, Lawrence S. Citeseer: An automatic citation indexing system[C]//*Proceeding of the 3rd ACM Conference on Digital Libraries*. New York; ACM Press,1998:89-98
- [5] Mobasher B, Cooley R, Jaideep S. Automatic personalization based on Web usage mining[J]. *Communications of the ACM*, 2000,43(8):142-151
- [6] Asnicar F, Tasso C. if Web: a prototype of user model-based intelligent agent for document filtering and navigation in the world wide Web[C]//*Proceeding of the 6th International Conference on User Modelling*. Chia Laguna, Sardinia, Italy, 1997: 3-11

- [7] David G, David N, Oki Brian M, et al. Using collaborative filtering to weave an information tapestry [J]. *Communication ACM*, 1992,35(12):61-70
- [8] Shardan U, Maes P. Social information filtering: Algorithms for automating "word of mouth"[C]//*Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. New York, USA, 1995:210-217
- [9] Joseph A K, Bradley N M, David M, et al. Grouplens: applying collaborative filtering to usenet news[J]. *Communications of the ACM*, 1997,40(3):77-87
- [10] Loren T, Will H, Brian A, et al. Phoaks: A system for sharing recommendations[J]. *Communications of the ACM*, 1997, 40(3):59-62
- [11] Dahlen B J, Konstan J A, Herlocker J L, et al. Jump-starting movielens: User benefits of starting a collaborative filtering system with "dead data"[R]. TR 98-017 Minnesota. USA; University of Minnesota, 1998
- [12] Goldberg K, Roeder T, Gupta D, et al. Eigentaste: A constant time collaborative filtering algorithm[J]. *Information Retrieval*, 2001,4:133-151
- [13] Barabasi A L. Linked: how everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life [M]. Plume, 2003
- [14] 艾瑞咨询. 中国搜索引擎行业年度监测报告[R]. 上海: 艾瑞咨询, 2011
- [15] Puers R, Thone J. Bio-Medical CMOS ICs [M]. Springer US, 2011:219-277
- [16] 王景欣, 王钺, 李一鹏, 等. 基于用户网络结构的信息协同过滤机制[J]. *物理学报*. 已录用
- [17] Li Yi-peng, Ren Yong, Yuan Jian, et al. Network statistical analysis in peer to peer application[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5):050000
- [18] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. *软件学报*, 2009, 21(1):124-137
- [19] Badrul M S, Joseph A K, Borchers A l, et al. Using filtering agents to improve prediction quality in the grouplens research collaborative filtering system [C] // *Proceedings of Computer supported cooperative work*. New York, NY, USA; ACM, 1998: 345-354

(上接第127页)

- [5] 王玮, 刘晓洁, 李涛, 等. 一种异地灾难恢复系统的设计与实现 [J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(9)
- [6] 朱立平, 李战怀, 温宗臣. RCDP: 基于冗余的连续数据保护架构 [J]. *微处理机*, 2009, 30(4)
- [7] Maohua L, Chiueh T-C. File versioning for block-level continuous data protection[Z]. Montreal, QC, Canada; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2009
- [8] 牟虹燕, 李战怀, 王泽林. 远程数据复制系统的性能优化策略 [J]. *微处理机*, 2009, 30(3)
- [9] Flouris M D, Bilas A. Clotho: Transparent Data Versioning at the Block I/O Level [C] // *NASA/IEEE Conference on Mass Storage Systems and Technologies*. CollegePark, USA, 2004
- [10] Ta-Shma P, et al. Virtual machine time travel using continuous data protection and checkpointing [C] // *Broadway, 17th Floor*.

- [11] Wang Li-na, et al. Building Hot Snapshot Copy based on Windows File System [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(6):1503-1506
- [12] 李旭, 谢长生, 杨靖, 等. 一种改进的块级连续数据保护机制 [J]. *计算机研究与发展*, 2009(05)
- [13] Sheng Y, et al. An efficient consistent point inserting method for block level continuous data protection [J]. *Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters*, 20(11):1101-1107
- [14] Sheng Y, et al. TH-CDP: An efficient block level continuous data protection system [Z]. Zhang Jia-jie, Hunan, China; IEEE Computer Society, 2009
- [15] 佟强, 陈珉, 王云. 基于 Mobile Agent 的分布式空间数据服务模式 [J]. *计算机工程*, 2004, 30(1)