

云环境下 P2P 流媒体传输关键技术^①

杨 戈^{1,2}, 田慧瑾¹

¹(北京师范大学珠海分校 信息技术学院, 广东 珠海 519087)

²(北京大学深圳研究生院 深圳物联网智能感知技术工程实验室, 深圳 518055)

摘要: 随着流媒体应用需求的日益增加, 不断改进和完善现有流媒体系统性能势在必行, 将云计算引入流媒体系统成为未来流媒体系统的一大趋势. 本文简单分析了云计算、CDN(Content Delivery Network)和 P2P(Peer to Peer)网络的优缺点和研究现状. 主要讨论并分析了云环境下的 P2P 流媒体传输系统所面临的带宽问题、流媒体数据处理、服务质量问题和系统中的关键技术——虚拟化技术、存储管理技术、调度技术和复制技术. 此外, 从搭建云计算实验环境角度, 本文列举了目前比较流行的 5 种仿真实验手段.

关键词: 云计算; P2P; 流媒体; 存储; 复制

Key Technologies of P2P Streaming Media Transmission in the Cloud Environment

Yang Ge^{1,2}, TIAN Hui-Jin¹

¹(College of Information Technology, Beijing Normal University(Zhuhai Campus), Zhuhai 519087, China)

²(Key Laboratory of Machine Perception, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: With the increasing demand of application of streaming media, continuous improvement and perfecting the existing streaming media system performance is imperative, and introducing cloud computing into streaming media system becomes a major trend of the streaming media system. This paper simply analyzes the advantages and disadvantages of cloud computing, CDN and P2P networks, and research development. The paper mainly discusses the problems of P2P streaming media transmission system in the cloud environment which are bandwidth, process of streaming data, quality of service. After that, summarizing virtualization technologies, storage management techniques, scheduling techniques and replication technology in the system. Furthermore, from the perspective of building experimental environment of cloud computing, the paper cited some popular means of simulation.

Key words: cloud computing; P2P; streaming media; storage; replication

1 引言

随着互联网迅猛发展, 互联网上的新型多媒体业务也逐渐受到广大用户的青睐. P2P 流媒体以其独特的传输方式更是占据了大量市场.

本文主要研究云环境下的 P2P 流媒体传输系统中的带宽、流媒体数据处理、服务质量等相关问题, 此外, 对虚拟化技术、存储管理技术、调度技术和复制技术也进行了研究与分析.

2 云计算系统简介

2.1 云计算定义

目前, 被业界普遍认同的云计算(Cloud Computing)定义是由美国国家标准与技术研究院(NIST)给出的. 其定义如下: 云计算是一种模式, 把无处不在的、方便的、按需分配的网络访问赋予给一个共享的、可配置的计算资源池(如网络、服务器、存储、应用程序和服务). 这些计算资源可以快速的分配和释放, 并且只需极少的

^① 基金项目:国家自然科学基金(60875050,61272364);国家高技术研究发展计划(2006AA04Z247);广东省自然科学基金(9151806001000025);深圳市科技计划及基础研究计划(JC201005270275A);深圳市战略性新兴产业发展专项资金(JCYJ20120614144655154);北京师范大学珠海分校科研创新团队(多媒体传输与计算机视觉研究团队,201251006);北京师范大学珠海分校教改项目(201329)

收稿时间:2013-05-15;收到修改稿时间:2013-07-01

管理工作和与服务提供商的互动^[1].

2.2 云计算特点

相对于如今广泛应用于企业内部的集群服务器来讲, 集群服务器是通过高速局域网相连, 由多个系统连在一起, 使多台服务器能够像一台机器那样工作, 便于防止故障的发生和进行有效的扩容. 从集群服务器的架设目的来看, 它更倾向于一个企业内部为完成某种特殊的、大规模应用而有针对性地进行建设和管理的一种体系架构. 类似的, 网络计算通过整合大量计算机资源构成一个虚拟组织来完成某种特定的大型计算, 其目的也是通过集成的资源来完成某种特殊任务.

云计算的特征可以通过以下五点进行描述^[1]: (1) 按需自助服务; (2) 宽带接入; (3) 资源“池”化; (4) 快速弹性架构; (5) 可测量的服务体系.

2.3 云计算服务模式及部署模型

云服务的交付可以分为三种模式以及不同的衍生组合. 这三种基本类型经常被称为“SPI”模型, 其中 SPI 分别代表软件、平台和基础设施(作为服务). 它们的定义如下^[2-5]:

- 云软件作为服务(SaaS: Software as a service): 提供给用户的能力是使用服务商运行在云基础设施之上的应用. 用户使用各种客户端设备通过“瘦”客户界面(例如浏览器)等来访问应用(例如基于浏览器的邮件).

- 云平台作为服务(PaaS: Platform as a Service): 提供给用户的能力是在云基础设施之上部署用户创建或采购的应用, 这些应用使用服务商支持的编程语言或工具开发, 用户并不管理或控制底层的云基础设施.

- 云基础设施作为服务(IaaS: Infrastructure as a Service): 提供给用户的能力是云供应了处理、存储、网络, 以及其它基础性的计算资源, 以供用户部署或运行自己任意的软件, 包括操作系统或应用.

根据云计算的部署方式, 可将其分为以下四种模型:

- 公共云. 由某个组织拥有, 其云基础设施对公众或某个很大的业界群组提供云服务.

- 私有云. 云基础设施特定为某个组织运行服务. 可以是该组织或某个第三方负责管理.

- 社区云. 云基础设施由若干个组织分享, 以支持某个特定的社区. 社区是指有共同诉求和追求的团体(例如使命、安全要求、政策或合规性考虑等). 可以是该组织或某个第三方负责管理.

- 混合云. 云基础设施由两个或多个云(私有的、社区的、或公共的)组成, 独立存在, 但是通过标准的或私有的技术绑定在一起, 这些技术促成数据和应用的移植性.

3 云环境下的架构

云计算有高扩展性、按需供给、灵活性等优点, 使得越来越多的学者开始致力于建设在云环境下的不同的架构模型. 目前, 与云计算相结合的两种主要的架构是 CDN 和 P2P^[6-8]. 本文将简单介绍和分析云环境下的 CDN 和云环境下的 P2P 的架构特点和研究现状.

3.1 云环境下的 CDN

CDN(Content Delivery Network), 即内容分发网络. 是一种新型网络构建方式其目的是使用户可就近取得所需内容, 代理缓存服务器距用户只有一跳之遥, 解决 Internet 网络拥挤的状况, 提高用户访问网站的响应速度. 虽然 CDN 是一个有效的流内容分发方式, 但是有两个障碍阻止了它成为一种更普遍的服务: 昂贵的架设成本和管理复杂性.

云计算可以解决 CDN 在 IT 基础设施上不足的问题, 并且云计算对 CDN 系统资源的统一管理、自动监控和弹性调度极大地促进了 CDN 系统的性能. 文献[9]通过 OpenStack 软件使用虚拟化技术搭建了一个云操作系统, 建立了一个云 CDN 网络, 使云计算监控 CDN 负载, 实现资源的按需分配、自动扩容和智能调度.

3.2 云环境下的 P2P

由于 P2P 网络是由用户节点构成, 所以它从很大程度上降低了服务提供商的成本并具有高可扩展性的优点. 但是由于其本身的高动态特性导致 P2P 网络的不稳定和不可靠, 用户节点的离开、管理的复杂性在一定程度上阻碍了其发展. P2P 的流行导致了 ISP 网络上流量的增加, 并且 P2P 应用程序不易管理. 由于用户总是只关心自己所需要的, 不考虑整体的利益, 导致 QoS(Quality of Service 服务质量)也成为一个问题. 因此, 更多的研究开始着手于将 P2P、CDN 和云结合起来, 取长补短, 利用各自的优点并避免其不足来架设新一代的网络模型.

基于内容管理方面, 文献[10]提出了一个 P2P 与云结合的低成本的动态内容管理网络 PA-Cloud (P2P-Assisted Cloud), 该模型主要在服务提供商提供的稳定核心云外层构建了由用户节点构成的扩展云,

主要使用扩展云进行低成本的动态内容管理从而降低核心云的负载,使得核心云可以专注于提供稳定的存储和备份.该模型具有以下优点:提高了系统的利用率,节约了服务商的成本,将动态管理的部分从云端转移到了低利用率的用户机器上,尤其当用户节点需要频繁访问和更新内容时,可以减少用户机器访问云端服务器的次数,提高了单位云端服务器可以处理的用户数.并根据内容的访问频率决定用户机在扩展云中扮演的角色(强一致节点、弱一致节点),定制出了一套完整的角色转换和更新机制发布的规则,在有效地完成动态内容管理的同时,解决了节点失效离开网络的不稳定问题和提高了对热点内容访问的适应力.但是由于过于复杂的角色管理机制和对于扩展云中的管理,使得其对于角色的选定、淘汰流程算法设计较为复杂.

关于云计算、CDN 和 P2P 的结合方式上,ZhiHui Lu 等人在云环境的需求下,提出了一个基于支持 Web 服务标准的松耦合式的 CDN-P2P 模型^[11].对于 P2P 与 CDN 结合的架构分为两种:一种是 1 对 1 的紧耦合模型,另一种是 1 对 N 的混合模型.

在 1 对 1 模型中,P2P 系统被捆绑在 CDN 系统上.换句话说,CDN 节点导致了 P2P 系统的建立.这种模型对于一个 CDN 与一个 P2P 系统整合在一起的情况非常有效,但是它不适合一个 CDN 与多个 P2P 的整合.

4 云环境下 P2P 流媒体系统

现存的大规模流媒体系统主要分为两类:中心式和 P2P 式.简而言之,中心式架构的流媒体系统由数据中心全权提供媒体服务,但是大多数的流媒体应用系统在用户人数不多的情况下质量不错,当人数达到一定数量时,其系统的服务质量就很难满足用户的需要^[12].P2P 式流媒体系统具有良好的扩展性,但其稳定性和可管理性不佳.文献[8]从编码技术和网络传输技术方面分析和阐述了构建大规模流媒体系统所面临的发展和现状.其中提到目前基于 P2P 技术的流媒体方案在异构性、网络服务质量和可扩展性问题上得到了一定程度的解决,但是安全性问题却始终是研究中的一大难点,P2P 技术的中间节点不可靠性增加了特殊的安全性挑战和高开销的问题,随着规模的增加,保存密钥所占用的节点存储空间、密钥生成所需要的计算量、密钥发送所占用的网络带宽、密钥更新的时间

延迟和密钥更新的频率都会随之增加.

从结构上看,云计算中心与传统的数据中心差异不大,都是有大规模集成服务器组成,但云计算数据中心具有以下特点^[13]:(1)自治性;(2)规模经济;(3)可扩展规模.

基于以上特点,一些学者将目光转移到在流媒体中引入云的概念.而在这当中,更多的关注点放到云计算与 P2P 结合的架构上^[4,14-15].针对现存 P2P 流媒体所面临的稳定性、安全性、管理性等问题,云计算良好的可控性和弹性化资源可以很好的弥补 P2P 网络的不足,将云计算与 P2P 网络结合势在必行.

4.1 研究现状

从网络环境架构方面考虑架设混合型流媒体系统时,最重要的一点便是角色的定位.目前的研究当中,云计算中心往往作为辅助型角色,提供安全、存储备份、计算辅助等功能.这不仅符合技术发展的路线,也保留了 P2P 本身所具有的巨大优势,由于单纯的利用云计算来实现流媒体系统不仅在成本上耗费巨大,在网络传输和带宽方面的瓶颈也很难突破.从系统规模上来看,目前流媒体系统趋向全球化发展,多数据中心及云中心的网络拓扑问题也不容忽视^[16].

云计算的弹性化扩展和自适应性对于流媒体拥有很大优势.Feng Wang 等人在域和时区不同的全球化环境下,设计了一个云辅助式流媒体直播框架——CALMS(Cloud-Assisted Live Media Streaming)^[17].针对全球化的加剧,用户的需求更加多样性和动态性,并且由于时差,全世界用户观看同一频道的高峰时间根据地区的不同而不同.CALMS 通过自适应地租用和精细地调整云服务器资源来适应时间和空间上流媒体用户的需求,并提出了最优化的解决方案来解决不同容量的云服务器租借费用.其架构分为两层——云层(Cloud Layer)和用户层(User Layer).其中云层包括流媒体直播源与动态租借的云服务器.当一个用户发出请求时,云层将根据地域差异和时间需求的不同重定向一个合适的云服务器给该用户,并且这一过程对用户是透明的.云层也会根据需求调整租借服务器的数量和地域分布.

利用云计算中心进行辅助式的存储统计也被纳入考虑.Xin Jin 等人针对移动互联网带宽限制方面,提出了通过云来辅助 P2P 流媒体解决手机用户带宽的限制问题^[14].目前的无线接入技术只能在提供高平均带

宽和广覆盖面积两者之间选择其一,不能同时兼顾。Xin Jin 等人通过云来收集和总结某一社区中节点的规律性数据并建立一个社会网络来鼓励节点的合作。为保证一个长期的流质量,节点需要通过合作的方式并形成联盟来贡献他们的带宽,当一个节点获取到了额外的带宽时,便加入这个联盟,否则便不属于这个联盟。云中负责存储节点的规律信息和业务提供商的内容记录,减少了用户访问提供商的频率。通过比较精确地对于节点活动规律的预测,保证了流媒体传输的时间和质量。不足之处在于由于节点是通过蓝牙发现周边节点,这点限制了社区的范围,该模型可以在小范围的传输中进行应用。

4.2 关键问题

虽然云计算对于 P2P 流媒体系统的管理有着诸多优势,但由于云计算目前只是一个通用的处理框架,并且其本身的发展尚未成熟,仍然有很多关键技术难题亟待解决。云计算环境下的 P2P 流媒体传输系统主要有以下问题: (1)带宽问题; (2)流媒体数据处理问题; (3)服务质量问题(QoS, Quality of Service)。

4.2.1 带宽

流媒体内容复制过程中需要消耗大量带宽,以优酷为例,根据统计,云带宽的费用占据了它超出一半的总收入^[15]。高带宽环境成为复制性能保障最基础的条件。在云环境下,大多数的云中心聚集在一处,呈局域网管理模式,对于带宽提供了一定保障。但考虑到未来云计算的大规模发展,局限于一地的云中心可能存在其距离用户较远的瓶颈问题,故采用 CDN 网络中靠近用户的思想也可能成为一种趋势,即云中心下分为多个分支来向更好提供更好的服务。这时,云中心和分支间的带宽问题则需要纳入考虑和规划当中。并且为尽量减少云中心与分支间的内容交换,选取较热门的副本放置在用户访问率高的地区是一个很好的选择。这也需要云中心计算模块中进行正确的调度及分配。

而针对解决带宽问题,加入 P2P 架构也不失为一种很好的选择。Zhenhua Li 等人提出了一种针对流媒体应用的混合式 CloudP2P 架构^[15]。它由一个云组件和很多对等群(Peer Swarms)组成。云的作用在于提供种子,并辅助终端用户找到其它有着相同兴趣的 Peers。对等群中的 Peers 互相可以交换数据。与纯粹基于云的方法相比,CloudP2P 降低了基础设施和网络带宽的花

费(尤其在需要建立大范围的 CDN 设施上)。

带宽不仅对于媒体的传输有着直接的影响,它还影响着流媒体系统内部复制策略的选择。Zhen Ma 等人^[18]通过模拟实验测试了当前流行的复制策略,得出当网络带宽充足时,不同类型的策略间没有太大差异,而在带宽有限时,不同的复制策略将导致性能的差异的结论。

4.2.2 流媒体数据处理

流媒体处理需要大量的计算资源,特别是对于编码和压缩。而云中的分布式并行计算为此提供了一个方向。通过云计算将输入的媒体内容分发到处理节点,然后合并处理后的媒体内容。使用分布式地视频压缩过程可以减少编码和压缩的时间,这对于高清晰度的视频非常有帮助。像一台 PC 机一样,当云作为处理功能被使用时,云中看似一样的廉价服务器则被赋予不同的角色^[19]。

目前云计算中数据处理策略主要有 MapReduce^[20]和 Dryad^[21]。两者的主要区别在于 MapReduce 将一个大数据分为多个小任务进行分布式处理,中间结果保留在进行处理的本地服务器上,最后再将中间结果合并得出最终结果,总体呈线性处理模式,虽然通过增加计算节点可以无限扩充计算能力,但其具体任务的划分和在迭代算法上具有瓶颈^[16]。针对此,Dryad 采用了基于有向无环图(DAG, Directed Acyclic Graph)的并行模型。在 Dryad 中,每一个数据处理作业都由 DAG 表示。其将处理方式扩展成为二维模式,使得处理更加灵活。但针对流媒体系统来讲,MapReduce 的处理方式虽然在某种程度上具有瓶颈,但是在媒体处理方面仍具有优势:可以简单将媒体分块,通过增加大量服务计算节点来对分块媒体进行编码、解码处理再合并为一个整体。

4.2.3 服务质量(QoS)

在产生流媒体和实际传递给用户的过程中,系统需要满足用户应用所需的服务,如服务器可用性、网络性能、服务相应时间、实时性等要求。云计算平台为大量用户提供各种资源计算等服务,其系统的架设自然离不开服务层的保障,通过服务层来保证用户所购买的服务是满足需求的。这其中涉及到安全、QoS 等诸多问题,本节主要针对流媒体系统的 QoS 进行讨论。

文献[16]中针对云计算体系依次介绍了 IaaS、PaaS 和 SaaS 层面的 QoS 保证机制,从原则上讲,对于用

户 QoS 的保障协商过程如图 3 所示: 服务商提供相关服务; 用户从中提出相应的 QoS 需求; 用户和服务商对服务质量进行相应匹配和协商, 当双方达成协议后服务商提供相应资源服务, 若服务商在提供服务的过程中没用达到事先制定的服务协议则需要被执行相应处罚。QoS 也一直与成本问题成反比趋势, Andrzejak 等人为了云计算应用服务层设计了竞价模型, 使其在满足用户 QoS 需求的前提下降低硬件设施开销^[23]。

而对于流媒体直播来说, QoS 意味着高性能的播放流畅度和低播放延迟。针对于此, Amir H 提出了一个云辅助式的 P2P 流媒体直播系统——CLIVE (Cloud-Assisted P2P Live Streaming)^[4]。该系统利用云计算来提高整体的带宽保证 QoS 的最低限。通过添加两种形式的帮助者(helper)——主动帮助者(AH: active helper)和被动帮助者(PH: passive helper)来加速内容的繁殖和提高整个系统可用的上传带宽。其中, AH 是主动的计算式节点, 即一个自动化的虚拟机器, 例如 Amazon EC2; PH 为被动的存储节点, 如 Amazon S3。它扩展了已存在的网格式 P2P 网络, 每个群中的 peer 周期性地向其它 peers 发送数据的可用性, 通过基于绯闻式的协议来收集当前状态, 在保证一定的 QoS 水平基础上, 通过一定的计算方法得出需要动态地从云设施中租用的 AH 和 PH 的数量并利用 CLIVE manager(CM)来控制租用 AH 的数量, 动态地添加或去除 AH 来最小化整体的成本花费。CLIVE 在保证 QoS 的基础上考虑到了成本问题, 可用于工业化开发, 其不足之处在于没有真实世界的系统评估, 只停留在模拟评估层面上。

4.3 关键技术

本节将综述云计算环境下的 P2P 流媒体系统现有技术的进展、解决方案及今后的研究方向。

4.3.1 虚拟化技术

云计算中运用到了一个关键的技术——虚拟技术。所以云计算的一个关键需求是其基础设施中大规模虚拟机的放置问题^[24]。虚拟机和物理结点之间的映射决定了云计算系统的性能、能耗并对 QoS 保证有重要影响。虚拟化技术为云计算基础设施资源的动态部署、安全隔离提供了重要保证^[25]。

虚拟技术可以分为两个级别: 硬件级别和软件级别。硬件级别的虚拟化首先通过服务器获得硬件的逻辑分区 LPAR(Logic Partition), 经过逻辑分区后的中央

处理器(CPU)资源可以通过负载管理节点(Workload Manager)来统一管理分配。通过这样的资源分配策略, 使相应的资源合理地分配到各个逻辑分区。目前, IBM 的“蓝云”采用了这一技术^[26], 其 P 系列服务器系统的逻辑分区最小粒度是 1/10 的 CPU。相比硬件级别的虚拟化技术, 软件级别的虚拟化被更多地采用。借助 Xen、VMware、KVM、Virtual Box 等虚拟机来模拟硬件的执行以提供可定制性强、扩展性高的虚拟化服务, 如亚马逊的 EC2 和 IBM 的“蓝云”都采用了 Xen^[26,27]。

虚拟机作为一类特殊的软件, 具有以下优点^[26]: (1)进程迁移方法更加灵活; (2)降低集群电能消耗; (3)通过不同物理节点上的动态迁移, 获得与应用无关的负载平衡性能; (4)通过直接复制虚拟机映像使得部署更加灵活。

总的来说, 虚拟化技术可以提供以下特点^[16]: (1)资源分享。通过虚拟机封装用户各自的运行环境, 有效实现多用户分享数据中心资源。虽然虚拟机可有有效地隔离用户的资源, 增加系统的安全和隐私保护, 但是 Ristenpart 等人发现 Xen 虚拟化平台存在被旁路攻击的危险^[28]; (2)资源定制。用户可以配置私有的服务器, 指定所需的 CPU 数目、内存容量、磁盘空间, 实现资源的按需分配; (3)细粒度资源管理。将物理服务器拆分成若干虚拟机, 提高服务器的资源复用率, 有助于服务器的负载均衡和节能。

流媒体内容存放在云计算平台中大量的服务器当中, 中心管理单元管理的也不再是物理服务器, 而是被虚拟映射后的一个个虚拟服务器。而流媒体复制技术中涉及到的副本存放、副本内容更新和删除等问题也都是基于虚拟化基础上进行讨论的。实时地调整虚拟资源的分配和释放, 避免过度占用内存, 负载均衡各个虚拟机的使用都需要被考虑, 而这些策略的设计, 即虚拟化调度使用的好坏直接影响着流媒体副本复制的效率和性能。文献[29]提出了虚拟机的“自发调节和全局调节”为部署资源提供了一个资源管理方向, 当内存资源充裕时, 各虚拟机可采用自发调节策略平衡内存资源; 处于资源紧缺时, 采用全局调节策略来平衡内存资源。文献[16]指出为满足云计算弹性服务和数据中心自治性的需求, 虚拟机的快速部署和在线迁移技术需要纳入考虑。而对于流媒体系统来说, 虚拟机的在线迁移技术显得尤为重要。当用户数量急剧增长或热门影片的需求迅速上升时, 服务器的负载也会

随之增加,为满足负载均衡的需求,通过在线迁移技术把负载过重的物理器上的虚拟机移动至闲置的物理器上,这个过程要求对用户透明化、无缝化,其目的在于在有效地保证用户服务质量的前提下,使得物理资源负载均衡化和增强系统的可靠性和容错性。

4.3.2 存储管理技术

云存储是一个将很多不同类型的存储设备集中在一起的系统,通过应用软件,对外提供这些存储数据的功能和业务接入,它可以将传统的本地数据存储移植到网络中,变成几乎无限扩展的和高可靠性的在线存储模式,并结合了极速发展的 WWW 应用程序的存储需求。目前,大多数的应用程序使用本地的存储,而作为一个远程的存储,云存储具有更经济和灵活的特点。云存储提供的是存储服务,存储服务通过网络将本地数据存放在存储服务提供商(SSP)提供的在线存储空间。需要存储服务的用户不再需要建立自己的数据中心,只需向 SSP 申请存储服务,从而避免了存储平台的重复建设,节约了昂贵的软硬件基础设施投资。

谷歌提出的 Google File System(GFS)是为 Google 应用程序设计产生的,内部部署了大量 GFS 集群,有的集群包含超过 1000 个存储节点,超过 300T 的硬盘空间^[26]。GFS 包含三种角色——主服务器(Master)、块服务器(Chunk Server)和客户(Client)。一个 GFS 集群包括一个主服务器和个块服务器,多个客户端访问。主服务器负责管理文件系统所有的元数据,包括名字空间、访问控制文件到块的映射、块物理位置等相关信息^[16,26,30]。

由于 GFS 中主服务器是唯一一个负责存储元数据和管理整个文件系统的节点,当用户或者块服务器数量上升时,主服务器处必然会产生瓶颈问题,虽然 GFS 采取了一些控制机制来预防瓶颈的产生,但是还没有从根本上解决这一问题^[31]。ZHAO Peng 等人对其架构进行了改进^[31],将主服务器更换为中心式 P2P 网络架构,当客户数量上升时,通过扩充节点(peer)数量来提高中心处理的能力。但其只在模块层面对架构进行了阐述,并未对细节设计进行深入讨论。关于将 P2P 架构思想加入云存储中,Ke Xu 等人从存储管理和检索方面设计了一个基于 P2P 的云存储体系结构^[32]。该结构中没有设置中心服务器。其体系中包括三个组成部分:客户(Client)、网关(Gateway)和块服务器(Chunk Server)。块服务器中包括三个模块:索引模块(Index Module)、路由模块(Routing Module)和块数据

(Chunk Data)。当用户应用程序发送请求时,包含逻辑标识符(Logic Identifier)的请求被发送至网关处,网关对数据块的标识符(Identifier of data block)进行分析,将其转化为可以被 DHT 算法识别的逻辑 ID,然后生成相应 P2P 搜索请求,该请求被传至块服务器群当中,并在服务器群中路由寻找存储着相应数据的特定服务器,一旦发现相应服务器后,将该服务器的 IP 地址返回至用户处,用户根据 IP 地址向该服务器再一次发出传输数据的请求。该结构解决了传统中心式云结构当中,当请求过多时,中心服务器所产生的瓶颈,其利用了网络中的网关和路由思想来解决云存储问题,为云存储架构提供了一个新的方向。但在进一步的搜索速度和网关处的转换管理处仍有待深入研究。

Fangming Liu 等人从存储空间方面,利用了云计算和存储云这样一个代表大规模存储池的概念,针对 P2P 视频点播这一应用,提出了一个基于 P2P 的存储云——Novasky^[33]。由于在真实世界的 P2P 视频点播系统中,每一个终端主机保留的存储空间是相当大的——通常超过 1GB。将这些终端节点两两地连接在一起,若存在一个数量庞大的用户,则有大量的存储空间参与其中,将它们汇集在一起,就形成了一个 P2P 存储云。和传统的 P2P 相比,这样一种 P2P 存储云是运作在一个高带宽的网络连接基础之上,一系列已经在内部连接在一起有着本地性特点的网络环境。

通过云存储技术来解决视频服务是切实可行的,也必将会成为一种趋势。而针对流媒体的云存储需要考虑以下几个问题^[5,17,33]。

(1) 将何种媒体资源存储在云中。通过云中的大量廉价服务器来作为媒体资源的备份具有非常高的稳定性和可靠性。但是若考虑 P2P 流媒体,随着媒体内容的不断更新和热点内容的增加,仅仅一味地利用云来作为所有媒体资源的备份变得过于浪费资源的利用率。P2P 其本身具有良好的可扩展性不能充分发挥出来。可以考虑将热点内容和访问频率较高的资源移植到 P2P 系统中,将不常访问到的资源备份在云中。

(2) 云中心的地理位置及云中的管理方法。云中的服务器可能集中在一起也可能来自不同的地区,虽然云中心可以提供大量的资源存储,但是如果云中心距离用户群过远,无疑在媒体的搜索、分发、延迟等方面存在问题。针对不同的用户群和需求,选择如何架设云中心变得非常必要。若采用 CDN 网络的思想,

划分子云在用户处,又要使用户看起来是由整个的一个云中心所提供,即对用户透明,那么在云层中的管理方法就尤为重要,云内部的服务器需要转播流媒体内容到其他服务器来扩展上传容量,对外的服务器需要传送流媒体内容到用户。

(3) 云服务器租用问题. 云计算旨在提供灵活的和可扩展的资源接入. 它可以在线提供可伸缩的带宽数量和其他资源. 而在现实世界中,云服务器的容量和租用价格是不一样的,租用时间也不可能无限短,服务器和价格的计算也不能在任意时刻被停止,因为对于服务器来说,配置和启动等都需要时间,即使这些服务设备的性能被提升了,这些硬件和软件的限制仍旧是不可完全避免的. 并且在动态租用云服务器过程中,对于所需资源容量的估计也成为一个问题,如何精确地估算出所需资源成为未来研究中需要考虑的问题。

4.3.3 调度技术

根据以往的研究,使用云计算和P2P的混合媒体云有着更大的潜力^[34]. 一个好的调度策略直接影响到系统内部的负载平衡性能、数据处理速度等方面,进而反映到用户的服务质量上. 针对架构特点的不同,云计算内部和P2P架构中的调度方法仍需分而治之. 为了最大化节省成本资源,“先本地,再远程”的思想应当被纳入考虑,即先由用户之间互相满足需求(热门媒体往往存在于用户群中),通过增添监控节点来实时反馈状态给云中心,云中心通过设定阈值等自动适应策略来决定是否提供资源辅助(如带宽、种子、冷门视频媒体等)。

目前的数据中心使用和考虑的资源调度算法大致可以分为5类^[35]:

(1) 简单的按需分配调度,按用户预订和立即使用的计算资源要求在线分配资源. 例如 IBM 等提供的科学计算、虚拟计算平台。

(2) 将资源进行分类并确定单位时间的收费标准,然后按照需求在线出租. 例如 Amazon EC2。

(3) 采用多级和分布式的数据中心以相应用户速度和质量为优化目标,例如 Google 搜索引擎。

(4) 针对海量信息处理的并行 MapReduce,先将大文件分割,映射到不同的一级处理(Map),然后再分配到不同的并行处理阶段(Reduce)进行整合. 例如开源系统 Hadoop,利用 Hadoop 设计的监控管理功能进行调度并实现负载均衡。

(5) 采用多级和分布式的数据中心,以能源消耗

效率为优化目标,目前多事实实验模拟阶段。

按调度策略分类,可按其目的将目前主要的调度策略分为两大部分:性能优先(负载均衡策略、高可靠性策略、最大化满足用户需求策略)和成本优先(最大化利用率策略、最大化利润策略、最小化成本策略). 其中,性能优先类中满足了用户的基本性能和可靠性,但是有着成本偏高和不易量化方面的缺点;与之相反,成本优先满足了大多数服务提供商的利益要求,却在相关性能的满足上有所缺乏. 两类中既有相抵触的方面也有可以互相融合的方面。

云计算数据中心将虚拟机按用户需求规格动态地自动化地分配给用户. 文献[35]提出了一个动态反馈综合负载均衡调度算法. 在一个数据中心的一个调度域(云数据中心分为多个调度域)内,使得每一个物理服务器的所有负载属性(CPU、内存、网络)在时间 t 内的平均负载不高于某一负载极限值,当其超过该极限值时,触发告警器迁移,进行调度,使之负载均衡. 该算法通过对服务器负载性能数据的实时采集,对服务器进行动态平衡调度,可以准确反映不同因素造成的过载并进行动态平衡. 但其算法复杂度较高并需要实时监控. 文献[36]中将关于社会分配性正义的伯格模型引入到了云计算作业调度中,将其资源分配方式类比于社会分配方式,使具有不同需求的用户获得更好的服务;利用到了伯格模型中的公平性约束思想,为不同的用户提供公平的资源使用机会. 考虑到了用户的 QoS 需求:完成时间、带宽、可靠性、费用. 算法将作业调度与负载均衡问题联系在一起,在有效的执行用户任务上和公平性方面取得了一定的进展,但其算法中任务的划分仍需细化并且没有考虑到其给服务提供商带来的成本问题。

从调度机制上考虑,文献[8]中提到一种上下行数据分离的透明数据传输机制. 其针对用户在向集群服务器发送请求时,处理和解决其集群对用户透明和减少通信数据的一种方法. 简单来说,用户向中心节点发送请求,中心节点找到合适的节点服务器,将请求转发到相应节点服务器上,然后节点服务器直接向用户返回请求内容,不再经过中心节点转发. 若将其上下行数据分离的思想应用到云中心内部复制策略的调度上,也可以减少节点服务器与中心管理服务器的通信量,提高效率,可以作为未来云计算环境下流媒体系统调度机制的一个方向。

在流媒体系统中, 调度和复制问题息息相关. Yipeng Zhou 等人提出了一个统一的请求调度模型——FSBD(Fair Sharing with Bounded Out-Degree)^[37], 模型中以可以服务于单个请求的最大节点数为参数. 基于这一统一化的模型, 可以比较不同类型复制策略的性能. 其分析了三个请求调度模型: Perfect Fair Sharing(PFS)、Fixed Bandwidth Allocation(FBA)和 Fair Sharing with Fixed Out Degree(FSFD). 其中 PFS 和 FSFD 在服务其他节点时, 给予同等对待, 即分配给每个请求节点相同的带宽. 而 FBA 中用于服务其他节点的带宽部分是被实现决定的并且针对不同视频内容也有所不同. 通过统一的调度模型 FSBD 进行分析后得出 PFS 是这三种策略中最优的, 但是 PFS 更倾向于选择冷门电影, 而 FSBD 则更具有比例性.

4.3.4 复制技术

一个流媒体复制系统来讲可以被视为一个排队网络模型. 对于每个请求, 系统安排一定数量的有着所需内容的节点为其服务. 这相当于一个排队系统服务规则. 与传统排队系统不同之处在于需要确认视频请求可以被特定的节点所服务. 而这取决于复制算法, 即在排队系统中可以被当作一个确认过程. 最优的复制算法需要将内容放置在不同的节点上, 满足存储和其他的限制条件来最小化服务器负载. 系统的性能基于两个因素: 内容复制和请求调度. 其中, 内容复制决定了哪个节点可以服务请求; 请求调度专注于一个请求如何被服务——通过哪些节点、每个节点提供多少带宽^[37].

复制问题中最关键的问题之一在于视频数据的分布. 网络中决定最优缓存放置问题被证明为 NP 难题^[9], 而对于副本放置位置的选择问题, 不同类型的流媒体系统的需求也不尽相同. 该问题在 P2P 流媒体环境下十分关键, 由于没有中心服务器, 节点之间存储交换媒体内容, 在传输过程中在何处节点上进行复制, 复制哪部分等问题都是十分复杂的数学问题. 而对于云环境下的流媒体系统, 由中心服务器统一调度管理, 节点服务器物理位置大多集中, 此问题则变得不是十分重要. 但在考虑云环境下的流媒体系统时, 并不只是单一的集群式中心管理架构, 它仍有可能与 P2P 或 CDN 的现有的网络架构结合在一起, 起到辅助计算或存储的作用, 副本放置策略的决定并不是单一的, 所以根据需求和规模设计不同的副本放置策略更为可行. 文献[38]针对层次化存储调度问题, 提出了一种利用

子树虚拟化来简化模型分析和调度策略设计的方法. 假设树根为内容服务器集群, 负责存储所有流媒体内容; 靠近终端用户的流媒体集群为树中子节点, 存储相对热门的流媒体内容. 本地流媒体服务器对用户点播直接进行服务, 若不能满足用户需求, 则经由内容分发网络获取文件, 再为用户提供服务. 存储调度在层次化存在流媒体服务系统中包含媒体内容在各个集群之间的分布, 在树形拓扑的前提下, 该策略将子树视为一个虚拟的节点, 将存储调度问题转化为根节点和虚拟成子节点的子树之间的若干次副本分配. 将副本放置策略分为两个阶段: 自顶向下的副本分发过程和自底向上的副本请求过程. 分发阶段充分利用上层节点服务能力来减少副本放置的代价; 由于在层数比较多的系统中, 经过副本分发后, 底层节点分配到的媒体文件比较少以至于其服务量远少于其服务能力, 这时在其服务能力允许的条件下, 通过自底向上的副本请求来向上请求更多的副本防止以增加本地的服务利用率, 提高层与层之间的节点负载均衡, 降低对于主干网络带宽的消耗.

基于视频分布之上, 流媒体复制片段的选择也需要纳入考虑. 复制对象的选择, 及热门对象的筛选至关重要. 利用云环境中强大的计算能力对用户访问媒体内容率进行统计, 制定一定的标准或算法来划分出媒体内容的热门程度. 由于云中心具有强大的存储能力, 故对于媒体内容的存储和访问率的统计提供了便利, 但资源总是有限的, 设计出合理地资源需求方案为能源节省和提高效率很关键. Zhen Ma 等人指出片段选择策略(The piece selection policy)^[18], 节点选择策略(the peer selection policy)和复制管理策略是 P2P 视频点播系统的核心策略. 针对这三种策略, 通过模拟实验测试了当前流行的相关方法并得出当网络带宽有限时, 顺序片段选择策略(the sequential piece selection policy)、级联节点选择策略(the cascading peer selection policy)和比例复制管理策略(the proportional replica management policy)有着最好的性能. 当网络带宽充足时, 不同类型的策略间没有太大差异. 而在 K.Wang 等人却提出比例复制方法可能具有差的性能, 尤其对于不流行的电影^[39]. Weijie Wu 等人提出了一个数学模型^[40], 并制定优化框架了解电影知名度对服务器负载的影响, 提出了一个被动替换和积极推动的策略. 该算法充分考虑到环境的动态性(节点的随时加入和离开)

和不同的电影播放率. 实现了高 QoS 保证的流媒体并减少了服务器的工作量.

针对流媒体复制方面, 还有一些其他的问题需要考虑, 如更新控制、容错技术, 能耗、安全问题等. 热点内容的实时变换为副本的更新控制带来了严峻的考验. 除了考虑在云环境计算热点内容的基础上建立阈值控制, 当到达设定的某一上限访问阈值时或被判定为热点内容时, 计算节点触发命令, 向中心节点请求进行副本的增加和对于冷门内容的替换^[9]方法. 也可引用缓存预取思想, 在中心集群服务节点中设立热点服务器, 将其作为 PC 中的内存, 专门用来存储实时热点内容, 这样, 当用户频繁请求热点内容时, 可以减少调度时间, 提高 QoS. 对于何时进行复制的问题, 先前的研究包括基于阈值和基于预测的复制. 基于阈值的复制存在明显的复制滞后、资源抖动等问题. 而基于预测的复制则具有一定的前瞻性, 其预测方法也有很多中: 简单的对用户访问次数进行统计^[41]; 基于 Zipf 分布来确定近似访问概率^[42]等. 文献[43]结合考虑到用户访问的历史记录、Zipf 分布、文件的自身属性(如文件不同的编码速率和播放时长)和文件的流行度等因素来综合决定副本的生成. 流媒体复制过程中容错技术也是需要纳入考虑中的. 数据中心作为云计算的基础, 需要解决海量数据环境下分布存储容错性方面的问题成为保障副本内容正确性、完整性和可靠性的关键^[44]. 能耗问题也是云计算中的重点研究方向之一. 针对流媒体系统, 探索如何将副本资源控制和能耗控制结合起来, 实现这些目标的最优化在未来的研究中也需纳入考虑^[24]. Armbrust M 等人提到影响云计算发展的最主要障碍是安全问题以及影响云的用户体验的性能瓶颈^[45]. 而流媒体系统的主要障碍也在于此. 同时, 多媒体应用较高的计算复杂度、实时性和服务质量的特殊要求, 以及对特殊硬件如 GPU(Graphic Processing Unit 图形处理器) 的依赖而对云计算平台提出了多方面的新要求, 而现有的大多数云平台并不能完全满足这些要求. 这也为在云平台下架多媒体业务不利^[46].

4.4 云计算实验环境

由于云环境通常过于庞大, 在实验阶段实施起来会有很大的困难. 对于该方面的研究, 大多采用仿真实验的手段来进行模拟. 当仿真实验获得一定成效时, 再考虑将其方法部署于实际环境中来进行测试. 本文

提供了 5 种方式来进行模拟实验:

(1) 租用 Amazon EC2 和 S3

由于 Amazon 在云计算方面的服务和租用费用较为成熟, 现有很多研究采用租用 Amazon 的对外云系统平台来进行模拟实验.

Amazon EC2 (Elastic Compute Cloud) 是一个让用户可以租用云电脑运行所需应用的系统, 提供可调整的计算能力^[47]. EC2 借由提供 Web 服务的方式让用户可以弹性地运行自己的 Amazon 机器镜像文件, 用户将可以在这个虚拟机上运行任何自己想要的软件或应用程序.

Amazon S3 (Simple Storage Service) 是一个公开的服务, Web 应用程序开发人员可以使用它存储数字资产, 包括图片、视频、音乐和文档^[3].

(2) 使用 Hadoop 架设云计算系统

企业或个人可以通过 Amazon EC2、GAE(Google App Engine)、Windows Azure(微软云计算平台)之类的云计算平台提供 SaaS 云计算软件服务, 但是若企业或个人想要提供 PaaS 云计算平台服务甚至是 IaaS 云计算设备服务, 就必须构建属于自己的云. 云计算软件中的佼佼者就是开放源代码的 Hadoop, 它是依据 Google 发表的 MapReduce 与 GFS(Google File System) 国际论文所编写的分布式云计算系统. 在有虚拟技术的情况下, 只需要一台够强力的计算机, 然后在系统上运行 Virtual Box、Xen、VMware 之类的虚拟软件, 依照计算机本身能力的大小, 可以一次仿真 3~5 个 Linux 操作系统, 每一个操作系统上都运行 Hadoop 软件, 就可以完成一个小型的 Hadoop 实验平台. 具体搭建方法可参考文献[48-49].

(3) Cloudsim

Cloudsim 是澳大利亚墨尔本大学的网络实验室和 Gridbus 项目宣布推出的云计算仿真软件^[50]. CloudSim 独特功能有: 一是提供虚拟化引擎, 旨在数据中心节点上帮助建立和管理多重的、独立的、协同的的虚拟化服务; 二是在对虚拟化服务分配处理核心时能够在时间共享和空间共享之间灵活切换.

(4) Eucalyptus

Eucalyptus 是加州大学圣巴巴拉分校开发的开源 IaaS 平台^[16]. 区别于 Amazon EC2 等商业 IaaS 平台, Eucalyptus 的设计目标是成为研究和发展的云计算的基础平台. Eucalyptus 的设计强调开源化、模块化, 便于研究者对各功能模块升级、改造和更换.

(5) OpenStack

OpenStack 是一个由美国国家航空航天局(NASA)和 Rackspace(全球三大云计算中心之一)合作研发的开源项目^[51]。其旨在为公共及私有云的建设与管理提供软件,帮助服务商和企业内部实现类似于 Amazon EC2 和 S3 的云基础架构服务(IaaS)。

5 总结

本文针对 P2P 流媒体所面临的带宽不足、计算资源不足、服务质量、底层服务器管理、媒体存储、媒体调度和副本等问题,从云计算环境角度和特点出发,研究了云计算环境下 P2P 流媒体系统中所需要解决的问题及相关关键技术。总体来说,架设云计算环境下的 P2P 流媒体传输系统的研究正处于发展阶段,虽然本文对相关问题和关键技术进行了分析阐述,但仍需要进行更深一层技术的挖掘和算法方面的研究。

参考文献

- 1 美国国家标准与技术研究院(NIST).<http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf>. 2011.9.
- 2 云安全联盟(CSA)官方网站.<https://cloudsecurityalliance.org>. 2011.11.14.
- 3 Amazon Simple Storage Service. <http://aws.amazon.com/s3/>. 2013.
- 4 Amir HP, Hanna K, Vimalkumar K, Alberto M, Seif H. Clive: cloud-assisted P2P live streaming. 12th International Conference on Peer-to-Peer Computing(P2P). 2012.9. 79-90.
- 5 Wu Y, Wu C, Li B, Qiu XJ, Lau FCM. CloudMedia: when cloud on demand meets video on demand. 31st International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS). 2011.6. 268-277.
- 6 刘晓琴.P2P 流媒体技术的研究与应用[硕士学位论文].天津:天津大学.2006.
- 7 杨戈,廖建新,朱晓民,樊秀梅.流媒体分发系统关键技术综述.电子学报,2009,37(1):137-145.
- 8 卫星.流媒体集群系统复制存储策略研究[博士学位论文].合肥:中国科学技术大学,2009.
- 9 湛丽.基于云计算的 CDN 平台研究及其缓存技术探索[硕士学位论文].广州:华南理工大学.2012.
- 10 沈静波.基于 P2P 和云计算的动态内容管理研究[博士学位论文].合肥:中国科学技术大学,2011.
- 11 Lu ZH, Wu J, Fu WM. Towards a novel web services standard-supported CDN-P2P loosely-coupled hybrid and management model. International Conference on Services Computing IEEE. 2010.7. 297-304.
- 12 尹浩,林闯,文浩,陈治佳,吴大鹏.大规模流媒体应用中关键技术的研究.计算机学报,2008,31(5):755-774.
- 13 Albert G, James H, Dave M, Parveen P.The cost of a cloud: research problems in data center networks. SIGCOMM Comput Commun Rev, 2008, 39: 68-73.
- 14 Jin X, Kwok YK. Cloud assisted P2P media streaming for bandwidth constrained mobile subscribers. 2010 IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems. 2010.12. 800-805.
- 15 Li ZH, Zhang TY, Huang Y, Zhang ZL, Dai YF. Maximizing the Bandwidth Multiplier Effect for Hybrid Cloud-P2P Content Distribution. IEEE 20th International Workshop on Quality of Service(IWQoS). 2012.6. 1-9.
- 16 罗军舟,金嘉晖,宋爱波,东方.云计算:体系架构与关键技术.通信学报,2011,32(7):3-21.
- 17 Wang F, Liu JC, Chen MH. CALMS: cloud-assisted live media streaming for globalized demands with time/region diversities. 2012 Proc. IEEE INFOCOM.
- 18 Ma Z, Xu K, Zhong YF. Exploring the policy selection of P2P VoD system-a simulation based research. IEEE 20th International Workshop on Quality of Service (IWQoS). 2012.6. 1-4.
- 19 Tan MF, Su X. Media cloud: When media revolution meets rise of cloud computing. Proc. of The 6th IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering. 2011.12. 251-261.
- 20 Dean J, Ghemawat S. MapReduce: a flexible data processing tool. Commun ACM, 2010, 53(1): 72-77.
- 21 Isard M, Budiu M, Yu Y, Birrell A, Fetterly D. Dryad: distributed data-parallel programs from sequential building blocks. EuroSys'07. Lisbon, Portugal. ACM. 2007. 59-72.
- 22 Stantchev V, Schr O, Pifer C. Negotiating and Enforcing QoS and SLAs in grid and cloud computing. GPC'09. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. 2009. 25-35.
- 23 Andrzejak A, Kondo D, Yi S. Decision model for cloud computing under SLA constraints. MASCOTS'10. 2010. 257-266.
- 24 李强,郝沁汾,肖利民,李舟军.云计算中虚拟机放置的自适应管理与多目标优化.计算机学报,2011,34(12).
- 25 张伟哲,张宏莉,张迪,程涛.云计算平台多虚拟机内存协同

- 优化策略研究.计算机学报,2011,34(12).
- 26 陈康,郑纬民.云计算:系统实例与研究现状.软件学报,2009,20(5):1337-1348.
- 27 Mocanu E, Andreica MI, Țăpus N. Current cloud technologies overview. International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. 2011. 289-294.
- 28 Ristenpart T, Tromer E, Shacham H, Savage S. Hey, you, get off of my cloud: exploring information leakage in third-party compute clouds. CCS'09. Chicago, Illinois, USA. ACM. 2009. 199-212.
- 29 张伟哲,张宏莉,张迪,程涛.云计算平台多虚拟机内存协同优化策略研究.计算机学报,2011,34(12).
- 30 Ghemawat S, Gobioff H, Leung S. The Google file system. SOSP'03. Bolton Landing, NY, USA. ACM. 2003. 29-43.
- 31 Zhao P, Huang TL, Liu CX, Wang X. Research of P2P architecture based on cloud computing. International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems(ICISS). 2010. 652-655.
- 32 Xu K, Song MN, Zhang XQ, Song JD. A cloud computing platform based on P2P. IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education. 2009.8. 427-432.
- 33 Liu FM, Shen SJ, Li BC, Yin H, Li SL. Novasky: cinematic-quality VoD in a P2P storage cloud. Proc. IEEE INFOCOM. 2011.4. 936-944.
- 34 Tan MF, Su X. Media cloud: When media revolution meets rise of cloud computing. Proc. of The 6th IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering. 2011.12. 251-261.
- 35 田文洪,赵勇.云计算——资源调度管理.北京:国防工业出版社.2011.
- 36 赵春燕.云环境下作业调度算法研究与实现[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2009.
- 37 Zhou YP, Fu TZJ, Chiu DM. A unifying model and analysis of P2P VoD replication and scheduling. IEEE INFOCOM. 2012.
- 38 李俊,周航,季海波.流媒体服务系统分层存储调度策略.系统工程与电子技术,2009,31(3).
- 39 Wang K, Lin C. Insight into the P2P-VoD system: performance modeling and analysis. Proc. 18th Int'l Conf. Computer Comm. and Networks (ICCCN). 2009.
- 40 Wu WJ, Lui JCS. Exploring the optimal replication strategy in P2P-VoD systems: Characterization and evaluation. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems. 2012.8. 1492-1503.
- 41 Jonathan D, Jeremy G. Dynamic repacking: a content replication policy for clustered multimedia servers [Technical Reports]. Dublin: Trinity College Dublin Computer Science Department TCD-CS-2002-36, 2002.
- 42 Xiao BZ, Cheng ZX. Optimal video replication and placement on a cluster of video on demand servers. Proc. of the 2002 International Conference on Parallel Processing. London. 2002. 238-247.
- 43 宋晓华,黄河清,曹元大.基于用户访问统计特性的流媒体文件复制策略.南京理工大学学报,2007,31(5).
- 44 王意洁,孙伟东,周松,裴晓强,李小勇.云计算环境下的分布存储关键技术.软件学报,2012,23(4):962-986.
- 45 Armbrust M, Fox A, Griffith R, Joseph AD, Katz RH, Konwinski A, Lee G, Patterson DA, Rabkin A, Stoica I, Zaharia M. Above the clouds: A berkeley view of cloud computing [Technical Reports]. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley. UCB/EECS-2009-28. CA, USA. 2009.
- 46 李铮.多媒体云计算平台关键技术研究[博士学位论文].合肥:中国科学技术大学,2011.
- 47 Amazon Elastic Compute Cloud. <http://aws.amazon.com/cn/ec2/>.
- 48 怀特.Hadoop 权威指南.北京:清华大学出版社.2010.
- 49 杨文志.云计算技术指南:应用、平台与架构.北京:化学工业出版社.2010.
- 50 Calheiros R, Ranjan R, Beloglazov A, De Rose C, Buyya R. Cloudsim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms. Software: Practice and Experience, 2011, 41(1): 23-50.
- 51 OpenStack. <http://www.openstack.org/>.2013.