

基于基准测试的高性能计算云研究

李春艳¹ 张学杰^{1,2}

(云南大学信息学院 昆明 650091)¹ (云南大学高性能计算中心 昆明 650091)²

摘要 随着云计算技术的发展,高性能计算云(HPC in the Cloud)已得到学术界和产业界的关注。由于虚拟化技术带来的性能开销,高性能计算云面临着一些挑战。针对“高性能计算+云”的计算模式,分析了高性能计算云的优势,深入介绍了国内外基于基准测试的高性能计算云的性能评测、性能优化、能耗和成本效益等关键问题,得出了针对基准测试的高性能计算云研究的基本思路,并对当前面临的问题和今后的发展趋势进行了总结和展望。

关键词 高性能计算,云计算,高性能计算云,基准测试

中图分类号 TP311 文献标识码 A

Research on Benchmark-based HPC in Cloud

LI Chun-yan¹ ZHANG Xue-jie^{1,2}

(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)¹

(High Performance Computing Center, Yunnan University, Kunming 650091, China)²

Abstract With the development of Cloud computing, the academia and industry give HPC in the Cloud more attention. As virtualization technology brings performance overhead, HPC in the Cloud is facing some challenges. On the basis of the “HPC+Cloud” computing paradigm, this paper analyzed the advantages of HPC in the Cloud, introduced the key issues about performance evaluation, performance optimization, power consumption, cost-benefit analysis at home and abroad in the implementation of benchmark-based high performance computing in the Cloud computing environment. Meanwhile, this paper got the basic ideas of research on benchmark-based HPC in the Cloud. At the end of this paper, we summarized the current issues, and prospected the foreground of HPC in the Cloud.

Keywords HPC, Cloud computing, HPC in the Cloud, Benchmark

1 引言

随着计算机技术的飞速发展,高性能计算机的计算速度不断提高,其标准也处在不断变化之中。分布式集群技术让高性能计算在不断突破峰值纪录的同时,使得原来的高性能计算也冲破了国家实验室的封锁,冲破了先进国家的边界,迅速走向普通大众。从 TOP500 HPC 排行榜^[1] 可看出,集群技术大行其道,占据垄断地位,集群技术能够以按比例扩展的方式,用低性能设备累加出高性能表现。伴随着高性能计算性能的提升和系统的日益庞大,单一计算平台与不同应用多样化需求的矛盾也日益突出,同时后期部署、管理、能耗、散热等成本也不断提高,传统的高性能计算正面临着很多严峻的问题:如何向用户提供可靠的 HPC 运行机制?如何向用户提供自主管理计算资源的能力?如何向用户提供可定制 HPC 环境以适应不同应用的需要?如何向用户提供按需的弹性资源以满足高峰需求?

云计算是一种新兴的计算模型,很多专家认为,云计算会改变互联网的技术基础,甚至会影响整个产业的格局。云计

算有诸如可扩展性、隔离性、迁移性和可定制以及弹性资源等很多优点^[2],而这些优点为传统的高性能计算集群提供了丰富的软件环境、应用程序隔离和高效率的工作负载管理机制。随着云计算的深入应用,为用户提供高质量的远程高性能云服务成为当前研究的热点。在云中“计算作为服务”(“Computing as a service”)^[3]已经鼓励了高性能计算延伸到更广泛的科学和工业社区,许多小型和中等规模的 HPC 用户都在探索基础设施云作为运行他们应用程序的一个可能平台,同时也指出了 HPC 应用作为一个服务(HPC-as-a-Service)的思想^[4]。然而,系统级的虚拟化带来了性能开销,I/O 瓶颈、网络性能不佳和 OS 噪声是一些在云中执行 HPC 应用程序所面临的挑战。能否把两者结合起来,达到相互补充、相得益彰的一种理想的计算模式,是目前学术界和企业界都非常感兴趣的研究——高性能计算云(HPC in the Cloud)。高性能计算云(HPC in the Cloud)是一种基于云计算环境下的高性能计算资源管理和服务的模式,有如下优势^[5]:

(1)如何向用户提供可靠的 HPC 运行机制。云计算环境中隔离性、容错为用户提供可靠的 HPC 运行机制,在某些节

到稿日期:2013-03-20 返修日期:2013-06-23 本文受国家自然科学基金项目(61170222),云南大学第五届研究生科研课题一般项目(yunuy201258)资助。

李春艳(1980—),女,研究生,主要研究方向为云计算和高性能计算,E-mail:lchy0316@gmail.com;张学杰(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为高性能计算、分布式系统、计算机网络及应用。

点失效的情况下,用户仍然可获得相关的服务,应用程序仍然可正常地运行。而实时动态迁移则为用户实现了负载均衡机制,在不影响作业正常运行的情况下,实现作业的重新部署。

(2)如何向用户提供自主管理计算资源的能力。在云计算环境中,用户是真正的计算资源的管理者和使用者,高性能计算云为用户提供统一的服务管理接口,用户可以自主地进行整体资源管理、服务流程管理、能耗与节能策略管理和镜像管理等。

(3)如何向用户提供可定制 HPC 环境以适应不同应用的需要。高性能计算云系统不仅支持虚拟环境的快速动态部署,而且提供不同的镜像模板来支持不同分布式应用(如 MapReduce、Hadoop、MPI 集群)编程模型的实时高效部署。由于云在对计算资源的管理模式上采用池化的办法,通过服务器、存储等虚拟化技术将计算资源按照不同的标准组成不同的易管理和使用的资源池。同时高性能计算云支持专用的高性能、低时延计算网络,如 Infiniband、万兆以太网等,最终用户可以通过云计算管理平台获取自己项目独占的计算资源,包括硬件、应用软件和操作系统等,用户可以在计算资源上按照自己的需求进行个性化调整。这样就为用户提供了可定制的 HPC 环境,包括高性能集群和存储服务,同时避免购买和维护昂贵的硬件资源。

(4)如何向用户提供按需的弹性资源以满足高峰需求。根据作业在运行期间对资源的需求情况,高性能计算云可以动态地分配或回收资源,使资源得到充分利用,同时又避免了资源的浪费。

2 相关工作

TOP500 使用 Linpack 测试性能,传统的 HPC 基准测试大部分选择 Linpack。但是, Linpack 仅仅强调 CPU 的峰值性能,忽略本地的网络带宽、延迟和存储等因素,单以 CPU 浮点操作能力无法反映基于高性能计算云的计算机系统可能存在的性能瓶颈,所以 Linpack 并不适合高性能计算云的基准测试。本文针对基于基准测试的高性能计算云的性能评测、优化、能耗和成本效益等关键问题进行研究。Indiana University, pervasive Technology Institute Andrew J. Younge 等人着眼于高性能计算环境的适用性,从特征比较到性能分析深入地介绍了当今通常被接受的一些虚拟化技术,通过 HPC Benchmark 得出结论:对支持 HPC 应用来说, KVM hypervisor 是最优的选择^[6]。

目前,在云计算环境下实施高性能计算的综述文章非常少,有些文章从某个角度或某一出发点进行综述。文献[7]综述了数据密集型计算编程模型的研究进展,其仅围绕编程模型而展开描述。文献[8]从面向服务的计算(Service-Oriented Computing)和网格计算提出云计算所面临的挑战和问题,并强调了不同云之间协同性问题。文献[9]综述了虚拟化技术在高性能计算机系统中的应用研究,结合国外公司和研究机构将虚拟化技术应用到高性能计算中的成功案例,把这些应用分成异构资源整合、系统容错、虚拟环境构建和并行编程 4 个部分加以介绍,此文仅仅着重于具体成功案例的介绍。文献[5]则较全面地介绍了高性能计算云的优势、适合哪些应用以及目前的研究现状和面临的挑战。我们的工作与之不同的是,我们侧重于基准测试(Benchmark),更全面地介绍了高

性能计算云针对基准测试的关键问题研究。本文第 3 节对高性能计算云的性能评测(包括标准、方法等)、性能优化(包括相关技术、优化内容等)、能耗和成本效益分析进行介绍,揭示其本质特征,使读者对目前高性能计算云针对基准测试方面有一个非常清晰的认识和了解;最后总结全文,指出未来研究方向并展望后续工作。

3 基于基准测试的高性能计算云研究

早在 2006 年, Lamia Youseff 等人评估了在 Xen 中应用 MPI 的性能影响^[10],通过他们的评估得出 Xen 对高性能计算应用来说并没有强加显著的性能开销。在同一年, IBM Watson 研究中心强调了在高性能计算环境下硬件虚拟化的重要价值^[11]。在 2007 年,相关研究成果表明,为了获得最好的性能和适应复杂的计算环境,虚拟化技术在高性能系统中是回避的^[12]。在 2008 年, MIT 的地球、大气与行星科学部门通过 HPC Benchmark 在 Amazon EC2 上研究了大气海洋气候模型^[13],同时, KIM H 等人提出了一种工作流管理框架和由云引擎所支持的调度可以有效整合高性能计算网格 TeraGrid 和云基础设施 Amazon EC2 的方法^[14],云计算能否达到 TOP500^[15]? 这些都引起了学术界和工业界的反思,人们提出究竟能否在云环境中有效地实施高性能计算的问题。本节主要从性能评测、性能优化、能耗和成本效益对目前高性能计算云的研究进行阐述。

3.1 性能评测

性能评测就是从基准测试程序和测试规范的角度评价和预测系统的性能。什么是性能?性能可以描述为人们所关注的系统的量化指标,比如, TOP500 所关心的高性能计算机的性能是以峰值运算速度(Linpack 性能)为主要评价指标^[16]。之所以进行性能评测,是为了定量分析在云计算环境中实施高性能计算相比于传统的高性能计算其性能损失究竟有多大,带着这种性能的损失,解决是否值得将传统的高性能计算迁移到云平台环境的问题。文献[3, 17-27]从性能评测的角度研究分析了云环境下高性能计算的性能,这些工作的一个共同的特点是:在云中测试了进行科学计算的单机或集群的性能,评估了虚拟化开销,指出了当前云计算对科学应用有一些差距和挑战。

3.1.1 性能评测指标

通常,评价一个系统的性能好坏可以用吞吐量(单位时间内系统的处理能力)、延迟(完成一项具体任务所花费的时间)和资源利用率(完成一项任务所需要花费的系统资源) 3 个方面来衡量^[28]。一般情况下,吞吐量越高、延迟越小、资源利用率越低则表示系统的性能越好,反之,则越差。而针对高性能计算云来说,不仅要体现高性能的特性,也要兼顾云的特点, CPU 浮点计算能力、带宽和功耗等是高性能计算云最为关注的性能评测指标。

3.1.2 性能评测工具——基准测试程序和测试规范

根据不同的基准测试程序,可分为微观基准测试程序和宏观基准测试程序两大类。

1. 微观基准测试程序

微观基准测试程序关注于独立的微观操作的性能,由于其测量的是微观的性能指标,因此很容易推测出系统在各种应用下的相对准确的性能。目前常用的测试云计算环境下有

效实施高性能计算的微观基准测试程序有如下几种:

(1) HPC Challenge (HPCC) Benchmark

HPCC^[29]是在美国政府的资助下以美国田纳西大学为主,由日美两国的 HPC 人员参与研制的,目的是对业界最流行的高性能计算机排名 TOP500 使用的基准 Linpack 进行补充,以便从各个角度对高性能计算机进行评测。HPCC 基准由 HPL、PTRAN、STREAM、RandomAccess、DGEMM、FFT、Latency-Bandwidth 等 7 类测试组成,除计算性能外,它还对计算机的内存访问、网络传输等性能进行综合评测,是目前对高性能计算云基准测试较全面的 Benchmark,不仅支持传统高性能计算对 CPU 浮点计算能力的基准测试,而且兼顾云计算中对带宽、延迟、存储等的基准测试。

HPCC 中的 HPL 基准即 Linpack 标准,是国际上最流行的用于测试高性能计算机系统浮点性能的 Benchmark,通过对高性能计算机采用高斯消元法求解一元 N 次稠密线性方程组的测试,评价高性能计算机的浮点性能。在 Linpack 测试的理论分析工作中,需要解决问题规模、矩阵分块、进程的映射、负载均衡等问题。而 Linpack 的测试结果受多方面因素的影响,包括与算法相关的参数设置、CPU 的架构数量和效率、内存容量、互连网络的通信性能、系统规模等。这些因素共同决定了系统 Linpack 测试的最终结果。文献[25]介绍了相关 HPCC Benchmark 的测试,在虚拟化环境(包括:VMware、KVM、VirtualBox)中评估了 HPC Challenge Benchmark 的性能,显示了 HPL 在所有的虚拟化环境中带来了开销,但是随着问题尺寸 N 变得越来越大,系统开销变得越来越小。因为问题规模 N 越大,有效计算所占的比例也越大,系统浮点处理性能也就越高;然而,问题规模 N 的增加会导致内存消耗量的增加,一旦系统实际内存空间不足,使用缓存,性能会大幅度降低。此外,对于集群上的 HPC 应用来说,互连技术至关重要,能力较差的互连技术将显著影响典型的 HPC 应用的性能^[22]。

(2) PARSEC Benchmark

PARSEC Benchmark^[30]是美国普林斯顿大学联合英特尔公司开发的,它由多线程程序的基准套件组成,是为共享内存的下一代芯片多处理器而设计的。

通过 PARSEC Benchmark 进行基准测试在文献[19, 31]中有相关介绍。其中,对共享内存和基于 MPI 应用程序的商业多核架构的虚拟化开销进行评估^[19],结果发现内存延迟的非均匀性严重影响了虚拟化系统的性能。共享内存的应用程序在虚拟化中遭受了很大的性能下降。当内核数量增加时,高速缓存层次结构和外部存储器将变得更加不对称,同时指出 NUMA 和 Cache 对共享内存应用程序来说是至关重要的。

(3) LMBench Benchmark

LMBench^[32]是一种用于测试不同平台上 OS 开销以及处理器、高速缓存、主存、网络和磁盘之间数据传输能力的可移植的基准测试程序,对识别性能瓶颈和系统设计十分有用。使用 LMBench 工具测试单个实例的计算性能在文献[18]中有详细介绍。

(4) IOR Benchmark 和 IOzone Benchmark

IOR Benchmark 和 IOzone Benchmark^[33],主要针对 I/O 的基准测试,其中 IOzone 是一个文件系统的 Benchmark 工

具,可以测试不同的操作系统中文件系统的读写性能。虚拟化给 I/O 型的应用带来了一定的性能开销,不同的高性能计算云平台基准测试 I/O 性能的结果在文献[24]中进行了对比,目的是识别现有基础设置中的主要瓶颈,通过 IOR Benchmark 分别在 Amazon EC2 和 Magellan 上比较了 I/O 性能,分析了不同存储的性能,最后从时间和空间的角度分析 I/O 的易变性。

2. 宏观基准测试程序

宏观基准测试程序来源于现实中的应用,是修改过的现实的应用程序,它主要衡量了实际环境下的被测试系统的整体性能。它的测量结果是现实的、非极端情况下的。但是它的测量结果极大地局限于负载的种类,如果要由一个负载下的测量结果推测其他环境下的测量结果,那么就会产生很大的不确定性。宏观测试程序的典型工作负载有内核编译、文件服务、数据库服务等。

(1) NAS Parallel Benchmark

NAS^[34]并行基准测试程序(NAS Parallel Benchmark, NPB)是由美国国家航空航天局开发的一套代表流体动力学计算的应用程序集,它已经成为公认的用于评测大规模并行机和超级计算机的标准测试程序。NPB 由 8 个程序组成,包括 5 个核心程序和 3 个模拟应用,分别从不同的方面反映了流体动力学计算的特点。

目前有很多工作使用 NAS Parallel Benchmark 对性能进行评估^[26, 35],其中文献[26]评测了物理机集群(PhC)和虚拟机集群(VMC),得出在云中实施高性能集群是可行的结论。

(2) SPEC Benchmark

SPEC^[36]是 Standard Performance Evaluation Cooperation 的首字母缩写, SPEC Benchmark 强调开发能反映真实应用(如实际负载等)的基准测试程序,并已推广至客户/服务器计算、商业应用和 I/O 子系统等。通过 SPEC 基准测试来评估虚拟化的开销,这方面的工作在文献[37]中有介绍。

此外,一些研究工作使用真实的应用程序(如:大气预测等)测试相关性能^[17, 20, 21, 23],其中文献[21]从扩展性的角度描述了一个科学的工作流应用程序在云中运行的经验。这个应用程序用于处理由 Kepler 项目发布的天文数据, NASA 根据这些天文数据去寻找类似地球的行星围绕其他恒星所产生的数据。使用 Pegasus 工作流管理系统,通过把工作流映射在多个云中(包括 FutureGrid、Magellan 云和 Amazon EC2 云)评估它的性能,并讨论了在云中部署和执行工作流所面临的挑战。同时演示了 Pegasus 如何支持同时跨多个云基础设施的天空计算(sky computing)。最后得出结论:天空计算对一些科学的工作流来说是一个可行且有效的解决方案。

3.2 性能优化

不论采用何种虚拟化技术,相对于物理机而言,处理器在 Hypervisor 上执行都将带来额外的虚拟化开销。执行的时间越长,虚拟化开销就越大,虚拟环境的性能就越差,反之虚拟环境的性能越好。因此,优化的重点就是如何降低这种额外的开销。

3.2.1 性能优化方法

通常情况下,指令的虚拟化是通过“Trap and Emulate”的方式实现的,而有些敏感指令不能通过这种方法处理,便导致了虚拟化漏洞,而采用如图 1 所示的硬件支持 CPU 虚拟化模

式可以很好地解决这个问题。在此模式中,非根模式(VMX Non-Root Operation;客户机运行所处的模式)下敏感指令引起的“陷入”被称为 VM-Exit。VM-Exit 发生时,CPU 自动从非根模式切换到根模式(VMX Root Operation;VMM 运行所处的模式),如在非根模式下执行了敏感指令、发生中断等。相应地,当从根模式切换成非根模式时,由 VMM 发起的行为,定义为 VM-Entry,通常是调度某个客户机运行。在发生 VM-Exit 和 VM-Entry 时,CPU 都会自动查询和更新 VMCS (Virtual Machine Control Structure),VMCS 保存虚拟 CPU 的相关状态,如 CPU 在根模式和非根模式下的特权寄存器的值,VMM 通过指令配置 VMCS,进而影响 CPU 的行为。这种上下文切换(根模式和非根模式的转换)带来了性能的开销,所以,目前,性能优化采用的主要方法是降低上下文切换的频率,即降低客户机退出事件发生的频率。为了降低上下文切换的频率,可以采用诸如硬件加速、共享内存、影子页表、直接分配 I/O 和批 Hypercall 等方法来实现^[28]。

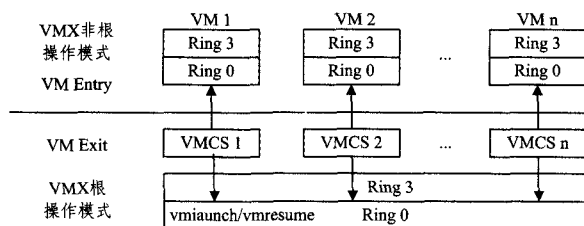


图1 硬件支持 CPU 虚拟化结构

3.2.2 性能优化的内容

针对高性能计算云,通过性能评测之后,如何在体系结构方面提高基于云环境下的高性能计算应用的性能是人们最为关注的。因此,有众多的工作集中在如何对云计算环境包括虚拟化技术进行优化,如对 OS、内存、网络、I/O 等的改进,对容错技术的优化等。这些工作的一个重要特点是着眼于可靠性、先通过测量的方法发现系统的瓶颈或者现有设计的不足之处,然后提出一些改进措施,最后用同样的基准测试程序来说明改进措施的效果。由此,也反映了性能评测工作是优化的基础^[16]。下面主要从网络、I/O、容错、隔离优化和资源分配优化等方面进行介绍。

1. 网络

由虚拟机和虚拟覆盖网相结合而构成的虚拟计算环境,在云计算和绿色计算中发挥非常重要的作用,然而,现有的虚拟计算环境在性能上难以满足高性能分布式计算的要求。这方面的工作在文献[38-41]中有介绍。其中文献[38,41]设计和实现了一种高性能虚拟网络:VNET/P,与早期的用户层虚拟网络系统不同,VNET/P 嵌入于可扩展、高性能的 Palacios 虚拟机监视器中,试用表明 VNET/P 具有高带宽的特点,其性能接近于实际硬件的性能。文献[40]则提出了一种使用 InfiniBand 集群构建 HPC 云计算的方法,其提供了高吞吐量和延迟意识的虚拟化节点和网络拓扑。

2. I/O

在云计算中,虚拟化技术被广泛地用于实现灵活性和安全性。在广泛地使用虚拟化的方案中,I/O 设备也需要被虚拟化,因此 I/O 性能严重地下降。在多达 4096 个 guest 结点的情况下,使用硬件和虚拟机监视器(VMM)使大规模 HPC 系统(如:Gray XT4)的虚拟化仅仅只有 5%的开销^[42],同时

描述了如此低开销的 3 种必不可少的技术:直通 I/O (pass-through I/O)、工作负载敏感的分页机制和小心控制抢占,这些技术是共生的虚拟化形式(SymVirt)^[43]。Huang wei 等人^[44]针对构建虚拟化集群系统提出了基于 Xen 和 InfiniBand 的架构,即通过 VMM-bypass I/O 技术和定制 OS 技术来减少虚拟化带来的额外性能开销,最后通过微观和宏观基准测试证明了此框架的有效性。除此之外,通过改变 I/O 设置来提高 HPC 应用在云中的性能在文献[45]中有介绍。

3. 容错

文献[46-49]从容错的角度研究高性能云策略,这些容错技术包括如下几个部分:

(1)断点/重启(checkpoint/restart)技术:这方面的工作在文献[46,47]中有相关介绍。

(2)过程级冗余技术(PLR):容错(Fault tolerance)允许云中的高性能系统的许多结点在出现错误的情况下仍然能够完成计算密集型应用的执行。而断点/重启(checkpoint/restart)技术增加了应用程序执行的 wall clock time^[48],提出了在云中的高性能计算的容错框架,通过过程级冗余技术(PLR)减少计算密集型应用程序执行的 wall clock time。

(3)FT/R (fault-tolerance/ resilience)技术:当应用程序和系统软件规模达到 multipetaflops 及 ExaScale 级别时,故障的发生将普遍存在。基于 HPC 的 FT/R (fault-tolerance/ resilience)的使用^[49],强调了虚拟化环境中错误注入(fault injection)机制对 FT/R 的评估,同时提出了在 HPC 环境中的一个新的错误注入框架。

4. 隔离优化

随着多核处理器内核数量的增加,越来越多的应用需要同时执行,所以对每个应用来说,达到性能隔离是至关重要的。一个简单、非侵入性方法^[31]是保证高性能应用的性能隔离。这种方法就是用虚拟化技术在同一处理器上创建多个被看作不同性能域的虚拟机。为了达到这个目的,此文献研究了两种不同的虚拟化方法:传统的托管虚拟化和裸机虚拟化。分析了虚拟机中执行应用程序的性能。两种虚拟化方法所提供的隔离性为所执行的应用程序提供了性能可预测性。结果表明,在虚拟化环境中执行的性能开销很小,裸机虚拟化的开销只有 3%,而传统的托管虚拟化的性能损失在 10%~30%之间。同时指出,虚拟化技术可达到应用程序的相互隔离,运行在虚拟机上的应用程序比物理机有更好的性能。

5. 资源分配优化

美国 Sandia 国家实验室的 Brandt 等人^[50]研究了在云计算环境下实现高性能计算(HPC)的问题,云计算环境中大规模的资源,可以为高性能计算提供便利条件,并且节省投资。由于 HPC 对可靠性有着严格的要求,因此需要对云计算资源进行有效的监控和管理。

(1)资源调度

• 从资源租赁的角度:由于在云计算环境中存在各种不同角色的用户,而不同角色的用户有着根本不同的利益,因此在云环境中规划资源租赁非常困难。为了适应这种多样化的异构性,在云计算市场为不同角色设计灵活的资源租赁模式是一个具有挑战性的问题。文献[4]研究了在云计算市场实施高性能计算服务(HPC-as-a-Service)的灵活资源租赁模式。从资源客户(resource customers)的角度出发,提出了符合成

本效益的资源出租规划模型,如:针对不同的 SLA,强调 performance/cost 比率还是更关心性能而不是花费等;从资源提供者(resource providers)的角度出发,为多租户云资源分享平台提出了一种新颖的服务调度模型。

- 从调度策略的角度:文献[3,51]都介绍了相关的调度策略,在 Amazon EC2 中应用 Gang Scheduling^[51],在任务迁移机制和任务饥饿处理方面进行了研究,同时显示此调度策略能够在云中有效实施,并有效地支持 HPC 应用。

- 从内存分配的角度:在评估了 HPC 基准测试的开销之后,通过调整 host 操作系统,为高效率的 guest 虚拟机内存分配使用大页面嵌套分页和适当的 NUMA 建构模拟(当虚拟机运行在 NUMA 主机上时),然后基于 KVM 和 Palacios,在处理器内核达到 240 的许多情况下,原本 10%~60% 的性能损失降低到 1%~5%,但是同时,存在几个应用的性能测试开销在 20%~45% 之间,并得出结论,KVM 提供了更稳定和可预测的结果,而 Palacios 对于大规模细粒度的测试是更优的^[37]。

(2) 镜像管理

在 FutureGrid(FG)项目中,制定一个框架来镜像^[52],FG 镜像管理框架允许用户产生、存储和部署 IaaS 云不同类型的镜像,因此用户能够非常容易地创建他们自己可定制的环境而不必担心每个平台的具体细节。除了云基础设施,FG 镜像管理也考虑了 HPC 的基础设施。FG 为用户提供了创建自定义的执行环境,让他们可以决定使用的操作系统或软件堆栈甚至 HPC 基础设施。最后,强调了由 FG 所产生的任何的镜像能够发布在任何支持的基础设施,如:IaaS 和 HPC。由于用户能够创建每个实例的相同的环境,使得不同基础设施的研究和比较变得容易。

3.3 能耗评测

目前提倡的绿色计算以保证计算系统的高效、可靠为前提,以计算系统的低耗为目标,面向新型计算机体系结构和包括云计算在内的新型计算模式,通过构建能耗感知的计算系统、网络互联环境和计算服务体系,为日益普适的个性化、多样化信息服务方式提供低耗支撑环境。高性能计算系统的能耗巨大,其生命周期内维持正常运行所需的电力成本已经超出了系统的硬件成本,高能耗不仅会降低云服务提供商的利润率,而且具有较高的碳排放量,对环境有一定的影响。并且随着性能的提升,系统能耗还在继续攀升,因此,如何在保证计算系统高性能、高可靠的前提下,设计以能耗为中心的计算环境构建方式、任务运行模式和资源配置机理,以有效应对包括多核、GPU 等在内的新型体系结构和云计算等快速出现的新型计算模式,就成为推动计算技术快速、绿色发展的一个重要内容^[53]。传统的高性能计算能耗测试大部分基于编译优化技术、能耗最优的资源分配和作业调度、设备资源管理等。但是,高性能计算云不仅要考虑传统的高性能计算的能耗,还有考虑云计算方面的能耗,如:虚拟化所带来的能耗,这方面的工作在文献[54-57]中有介绍。其中文献[57]研究了服务器整合的整体性能和能源效率,通过 Benchmark 和真实负载对高性能计算云中的服务器进行测试,用 Linpack Benchmark 测试处理器的性能;用 BurnInSSE Benchmark^[58]测试处理器的能耗;用 Bonnie++ Benchmark^[59]测试磁盘输入输出性

能,最后得出能源效率取决于该虚拟化服务的负载和虚拟服务器数量的结论。文献[56]则在高性能计算云中针对实际的 HPC 负载对能耗进行测试,提出了一种多目标遗传算法(MO-GA),同时还提出一个贪婪启发式算法,其目的是最大化调度应用程序的数量。通过基准测试把两者进行比较,结果显示,MO-GA 优于贪婪启发式的能源消耗和二氧化碳排放量,此外,当调度更多的应用程序时,MO-GA 证明在利润方面是更优的。

3.4 成本效益分析

高性能计算云是一种具有成本效益的高性能计算模式,从某种角度来看,追求高性能的 HPC 与侧重成本效益的 Cloud 之间存在着一定的矛盾。HPC 应用是否适合运行于 Cloud 环境呢?已有的研究说明,商业云计算供应商确实可以提供 HPC 集群,并适合一定范围内的科学计算应用^[5]。荷兰的国家高性能计算和 e-Science 服务中心 SARA 开发了一个基于 OpenNebula 开源云平台、面向科研领域的 HPC 云^[60],虚拟化在此项目中扮演了关键的角色。下面基于 Amazon EC2 平台,针对适合 HPC 应用程序的群集计算实例(四倍超大型群集计算实例)^[61]测试计算机集群节点数量与单位金额所获得的计算性能的关系。Amazon EC2 部分实例的定价如图 2 所示,测试环境如下:

(1)四倍超大型群集计算实例:23GB 内存,33.5 个 EC2 计算单位,1690GB 本地实例存储,64 位平台,10 千兆以太网,由图 2 可知,此实例定价为每小时 1.3 美元。

(2)集群软件环境:

HPC Benchmark/1. 3. 1、MPICH2/1. 5、GOTOBLAS2/1. 13。

内存增强型按需实例	
超大型	\$0.450 每小时
双倍超大型	\$0.900 每小时
四倍超大型	\$1.800 每小时
CPU 增强型按需实例	
中	\$0.165 每小时
超大型	\$0.660 每小时
群集计算实例	
四倍超大型	\$1.300 每小时
八倍超大型	\$2.400 每小时
群集 GPU 实例	
四倍超大型	\$2.100 每小时
高 I/O 按需实例	
四倍超大型	\$3.100 每小时

图 2 Amazon EC2 不同实例的费用

基准测试结果如图 3 所示,由此可知,随着节点数量的增加,单位成本所获得的计算性能在急剧下降,但是,当节点数量继续增大时,计算性能下降的趋势减缓,总之,集群节点越多、运算规模越大,云计算所提供的计算性价比就越低,这是当前制约基于云环境中进行高性能计算的一个主要原因。文献[18]采用 EC2 中超大型 CPU 增强型按需实例,得到与此相类似的结论。此外,我们发现,在基于 OpenMP 的共享内存的多核架构上,存在同样的问题。在虚拟化环境中,随着在一个节点上部署的虚拟机越来越多,将带来更高的性能开销。如:在一个 8 核节点的物理机上部署 8 个虚拟机,应用程序的性能开销明显小于在一个 32 核节点的物理机上部署 32 个虚拟机。因此,大规模的 HPC 应用不适合在高性能计算云中运行,高性能计算云仅适合一定范围中小规模的科学计算。

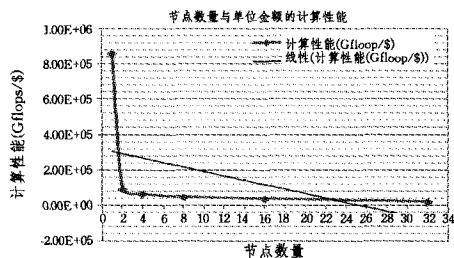


图3 集群节点数量与单位金额的计算性能关系

4 问题与展望

从目前的研究可以看出,适合高性能计算的云计算环境这一领域正处于研究阶段,高性能计算云面临一些重要问题有待解决。主要有:如何进一步降低虚拟化技术带来的性能开销;如何在多维异构的计算机系统中协调多个虚拟机管理器;如何保证大规模虚拟 HPC 环境的可靠性、伸缩性和低耗特性;如何在资源竞争的高性能计算云中保证 QoS;如何确定平台标准和规范、保护数据安全等^[5]。

“云计算”概念目前已被大量运用到生产环境中,各种“云计算”的应用服务范围正日渐扩大,影响力也无可估量。相比之下,高性能计算云的应用还相当有限。高性能计算云因较小的性能开销以及灵活的使用和管理等优势,必将成为中小规模计算集群市场的最有力的竞争者,并将取代传统的用户私有物理集群的位置,实现 HPC-as-a-service 的思想^[5]。随着高性能计算技术的发展(如: infiniband 和 GPU 的发展)以及云计算关键技术的深入研究,两者之间的结合将会变得越来越紧密,云计算的诸多优势也将在高性能计算中再现,高性能计算云将以一种新的资源管理和服务的模式为大家提供按需动态的服务。

结束语 本文对高性能计算云性能评测和性能优化的最新研究动态进行了总结分析和归类,并通过成本效益分析,验证了高性能计算云不适合大规模 HPC 应用的结论。从目前的研究可以看出,测试床主要集中在 FutureGrid、Amazon EC2、Magellan 和 Open Cirrus 4 大平台;基准测试则集中在 HPC Benchmark、NAS Benchmark、SPEC Benchmark 和 PARSEC Benchmark;涉及到代表性的编程模型有 MapReduce、Hadoop 等。从研究趋势上来看,从以前侧重于基于管理器的虚拟化(hypervisor-based virtualization)慢慢开始转向基于容器的虚拟化(container-based virtualization)来研究高性能计算云的性能问题,而 VMM Palacios^[37,38,41]对实现大规模 HPC 系统虚拟化有较好的性能,是目前研究的一个热点。这些研究还将继续,因为云计算环境下的高性能计算的应用还不多见,其主要原因是高性能计算应用通常对系统性能有苛刻的要求,而虚拟化必将带来性能的损失,这对于许多高性能计算应用来说是不能接受的。随着虚拟化技术的不断发展,硬件辅助虚拟化等技术越来越多地加大对硬件虚拟化的支持,有效地降低了虚拟化的性能开销^[9]。同时高性能计算机体系结构向多层次、多粒度的异构化方向发展的趋势也必将进一步推动云计算环境下高性能计算的发展,所以高性能计算云以其独有的特点,势必会对未来超级计算中心产生显著的影响。

高性能计算将带来很大的能耗,目前提倡低能耗和绿色计算,我们将来的工作将着眼于高性能计算云的能耗分析,如

何在保证性能的情况下最大限度地降低能耗;除此之外,在云环境中,由于虚拟化技术、I/O 性能严重下降,I/O 密集型的 HPC 应用更是高性能计算云的瓶颈,针对不同的技术研究如何优化在高性能计算云中实施 I/O 密集型的 HPC 应用也是我们将来所面临的一个重要研究内容。

参考文献

- [1] TOP 500 Supercomputer Site[OL]. <http://www.top500.org>
- [2] 李乔,郑啸. 云计算研究现状综述[J]. 计算机科学,2011,38(4): 32-37
- [3] Gupta A, Milojicic DS, Kalé LV. Optimizing VM Placement for HPC in the Cloud[C]// Proceedings of the Workshop on Cloud Services, Federation, and the 8th Open Cirrus Summit, 2012: 1-6
- [4] Zhao Han, Li Xiao-lin. Designing Flexible Resource Rental Models for Implementing HPC-as-a-Service in Cloud[C]// The 26th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum, 2012: 2550-2553
- [5] 吴松,陈海宝,金海. HPC Cloud——新兴的高性能计算模式[J]. 中国计算机学会通讯,2011,7(10):48-55
- [6] Younge A J, Henschel R, Brown J T, et al. Analysis of Virtualization Technologies for High Performance Computing Environments[C]// Proceedings of The 4th IEEE International Conference on Cloud Computing(CLOUD 2011), 2011
- [7] 王鹏,孟丹,詹剑锋,等. 数据密集型计算编程模型研究进展[J]. 计算机研究与发展,2010,47(11):1993-2002
- [8] Dillon T, Wu C, Chang E. Cloud Computing: Issues and Challenges[C]// The 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2010: 27-33
- [9] 钱磊,李宏亮,谢向辉,等. 虚拟化技术在高性能计算机系统中的应用研究[J]. 计算机工程与科学,2009,31(A1):307-311
- [10] Youseff L, Wolski R, Gorda B, et al. Evaluating the Performance Impact of Xen on MPI and Process Execution For HPC Systems [C]// Proceedings of the 2nd International Workshop on Virtualization Technology in Distributed Computing(VTDC), 2006
- [11] Mergen MF, Uhlig V, Krieger O, et al. Virtualization for high-performance computing [J]. ACM SIGOPS Operating System Review, 2006, 40(2): 8-11
- [12] Vallee G, Naughton T, Scott S. System-Level Virtualization for High Performance Computing[C]// The 16th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing, 2008: 636-643
- [13] Evangelinos C, Hill C. Cloud Computing for parallel Scientific HPC Applications; Feasibility of running Coupled Atmosphere-Ocean Climate Model on Amazon's EC2[C]// The First Workshop on Cloud Computing and its Applications (CCA'08), October 2008
- [14] Kim H, el-Khamra Y, Jha S, et al. An Autonomic Approach to Integrated HPC Grid and Cloud Usage[C]// The 5th IEEE International Conference in e-Science'09, 2009: 366-373
- [15] Napper J, Bientinesi P. Can Cloud Computing Reach The TOP500? [C]// Proceedings of the Combined Workshops on Unconventional High Performance Computing Workshop Plus Memory Access Workshop, Ischia, Italy, May 2009
- [16] 黄达伟,叶可江,陈建海,等. 虚拟计算系统性能评测[J]. 中国计算机学会通讯,2011,7(10):8-15
- [17] Ekanayake J, Fox G. High performance parallel computing with

- clouds and cloud technologies[C]// Cloud Computing Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 2010;20-38
- [18] 张士勋. 云计算在科学计算中的应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010
- [19] Han J, Ahn J, Kim C, et al. The effect of multi-core on HPC applications in virtualized systems[C]// The 5th Workshop on Virtualization and High-Performance Cloud Computing. 2010
- [20] Iosup A, Ostermann S, Yigitbasi N, et al. Performance Analysis of Cloud Computing Services for Many-Tasks Scientific Computing[C]// Proceedings of IEEE Trans. on Parallel and Distributed System. 2010
- [21] Vockler J-S, Juve G, Deelman E, et al. Experiences Using Cloud Computing for A Scientific Workflow Application[C]// The 2nd Workshop on Scientific Cloud Computing (ScienceCloud). 2011
- [22] Ramakrishnan L, Canon R S, Muriki K, et al. Evaluating Interconnect and Virtualization performance for High Performance Computing[C]// The second international workshop on performance modeling, benchmarking and simulation of high performance computing systems. ACM, 2011
- [23] Birkenheuer G, Brinkmann A, Kaiser J, et al. Virtualized HPC: a contradiction in terms? [EB/OL]. Software: Practice and Experience 2011, DOI: 10. 1002/spe. 1055, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/spe.1055/full>
- [24] Ghoshal D, Canon R S, Ramakrishnan L. I/O Performance of Virtualized Cloud Environments[C]// The second international workshop on data intensive computing in the clouds, ser. Data-Cloud-SC '11. New York, NY, USA; ACM, 2011; 71-80
- [25] Luszczek P, Meek E, Moore S, et al. Evaluation of the HPC Challenge benchmarks in virtualized environments[C]// The 6th Workshop on Virtualization in High-Performance Cloud Computing. Bordeaux, France, August 2011
- [26] Gómez J, Villar E, Molero G, et al. Evaluation of High Performance Clusters in Private Cloud Computing Environments[C]// The 9th International Conference. Springer, 2012; 305-312
- [27] Ahuja S P, Mani S. The State of High Performance Computing in the Cloud[J]. Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 2012, 3(2)
- [28] 英特尔开源软件技术中心, 复旦大学并行处理研究所. 系统虚拟化——原理与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009
- [29] HPC CHALLENGE[EB/OL]. <http://icl.cs.utk.edu/hpcc/index.html>
- [30] PARSEC Benchmark[EB/OL]. <http://parsec.cs.princeton.edu/>
- [31] Petrides P, Nicolaides G, Trancoso P. HPC Performance Domains on Multi-core Processors with Virtualization[C]// The 25th International Conference. Munich Germany, 2012
- [32] LMBench Benchmark [EB/OL]. <http://www.bitmover.com/lmbench/>
- [33] IOzone[EB/OL]. <http://www.iozone.org/>
- [34] NAS Parallel Benchmark [EB/OL]. <http://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html>
- [35] Xavier M G, Neves M V, Rossi F D, et al. Performance Evaluation of Container-based Virtualization for High Performance Computing Environments[C]// The 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. Belfast, Northern Ireland, 2012
- [36] SPEC Benchmark[EB/OL]. <http://www.spec.org/>
- [37] Kudryavtsev A, Koshelev V, Pavlovic B, et al. Virtualizing HPC applications using modern hypervisors[C]// Proceedings of the Workshop on Cloud Services, Federation, and the 8th Open Cirrus Summit. 2012; 7-12
- [38] 唐源, 夏磊, 崔峥, 等. 嵌入虚拟机监视器的高性能虚拟网络[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1195-1200
- [39] Mauch V, Kunze M, Hillenbrand M. High performance cloud computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(6): 1408-1416
- [40] Hillenbrand M, Mauch V, Stoess J, et al. Virtual InfiniBand Clusters for HPC Clouds[C]// The 2nd International Workshop on Cloud Computing Platforms, CloudCP '12, New York, NY, USA; ACM, 2012, 9: 1-9
- [41] Lei Xia, Zheng Cui, Lange J, et al. Vnet/p: bridging the cloud and high performance computing through fast overlay networking[C]// The 21st international symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing, ser. HPDC 12. New York, NY, USA; ACM, 2012; 259-270
- [42] Lange J, Pedretti K, Dinda P, et al. Minimal-overhead virtualization of a large scale supercomputer[C]// The 2011 ACM SIGPLAN/SIGOPS International Conference on Virtual Execution Environments (VEE). 2011
- [43] Takano R, Nakada H, Hirofuchi T, et al. Cooperative VM Migration for a Virtualized HPC Cluster with VMM-Bypass I/O devices [C] // The 8th IEEE International Conference on eScience. 2012
- [44] Huang Wei, Liu Jiu-xing, Abali B, et al. A Case for High Performance Computing with Virtual Machines[C]// The 20th annual International Conference on Supercomputing. 2006; 125-134
- [45] Liu M, Zhai J, Zhai Y, et al. One Optimized I / O Configuration per HPC Application: Leveraging the Configurability of Cloud [C] // The Second Asia-Pacific Workshop on Systems, ser. APSys '11. New York, NY, USA; ACM, 2011; 1-5
- [46] Okorafor E. A Fault-tolerant High Performance Cloud Strategy for Scientific Computing[C]// IEEE International Parallel & Distributed Processing Symp. 2011
- [47] Niola B, Cappello F. BlobCR: Efficient Checkpoint-Restart for HPC Applications on IaaS Clouds using Virtual Disk Image Snapshots[C]// The 24th International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. Seattle, USA, 2011; 1-12
- [48] Egwuotuoha I P, Chen S, Levy D, et al. A Fault Tolerance Framework for High Performance Computing in Cloud[C]// The 12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. 2012
- [49] Naughton T, Vallee G, Engelmann C, et al. A Case for Virtual Machine Based Fault Injection in a High-Performance Computing Environment[C]// Lecture Notes in Computer Science, Parallel Proceedings Workshops. 2012; 234-243
- [50] Brandt J, Gentile A, Mayo J, et al. Resource monitoring and management with OVIS to enable HPC in cloud computing environments [C]// The 23rd IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington DC; IEEE Computer Society, 2009; 1-8

- [51] Moschakis I A, Karatza H D. Performance and Cost Evaluation of Gang Scheduling in a Cloud Computing System With Job Migrations and Starvation Handling, [C]// The 16th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2011). 2011; 418-423
- [52] Diaz J, Laszewski G V, Wang Fu-gang, et al. FutureGrid Image Management Framework to Support Cloud and HPC Dynamic Provisioning [R/OL]. <http://cyberaide.googlecode.com/svn-history/r5739/trunk/papers/a-draft/draft-11-imagemanagement/draft-11-imagemanagement.pdf>
- [53] 过敏意. 绿色计算: 内涵及趋势[J]. 计算机工程, 2010, 36(10): 1-7
- [54] Garg S K, Yeo C S, Anandasivam A, et al. Energy-Efficient Scheduling of HPC Applications in Cloud Computing Environments[J]. Computer Science, Distributed, Parallel, and Cluter Computing, 2009
- [55] Garg S K, Yeo C S, Anandasivam A, et al. Environment-conscious scheduling of HPC applications on distributed cloud-oriented data centers[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(6): 732-749
- [56] Kessaci Y, Melab N, Talbi E G. A pareto-based GA for scheduling HPC applications on distributed cloud infrastructures[C]// International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS). 2011; 456-462
- [57] Kommeri J, Niemi T, Helin O. Energy Efficiency of Server Virtualization[C]// The Second International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, 2012
- [58] BurnInSSE Benchmark[EB/OL]. <http://www.roylongbottom.org.uk>
- [59] Coker R. Bonnie++ Benchmark [EB/OL]. <http://www.coker.com.au/bonnie++/>
- [60] SARA HPC Cloud [OL]. https://grid.sara.nl/wiki/index.php/Using_the_HPC_Cloud/betaevaluation
- [61] Amazon Elastic Compute Cloud[EB/OL]. <http://aws.amazon.com/ec2/>, 2007-01-01

(上接第 8 页)

- [36] Al-Riyami S S, Paterson K G. Certificateless public key cryptography[C]// Lai H CS, ed. Proc. of the ASIACRYPT 2003. LNCS 2894, Berlin; Springer-Verlag, 2003; 452-473
- [37] Zhang F T, Sun Y X, Zhang L, et al. Research on certificateless public key cryptography[J]. Journal of Software, 2011, 22(6): 1316-1332
- [38] Mandt T K, Tan C H. Certificateless authenticated two-party key agreement protocols[C]// Advances in Computer Science-ASIAN 2006, Secure Software and Related Issues. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008; 37-44
- [39] Wang S B, Cao Z F, Wang L C. Efficient certificateless authenticated key agreement protocol from pairings[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(5): 1278-1282
- [40] Swanson C M. Security in key agreement; Two-party certificateless schemes[D]. Waterloo; University of Waterloo, 2008
- [41] Lippold G, Boyd C, Nieto J G. Strongly secure certificateless key agreement[C]// Proceedings of the Pairing 2009. Lecture Notes In Computer Science, 2009(5671): 206-230
- [42] 葛爱军, 陈少真. 具有强安全性的不含双线性对的无证书签名方案[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1765-1769
- [43] Baek J, Safavi-Naini R, Susilo W. Certificateless public key encryption without pairing[C]// ISC 2005. LNCS 3650, Berlin; Springer-Verlag, 2005; 134-148
- [44] Sun Y X, Zhang F T, Baek J. Strongly secure certificateless public key encryption without pairing[C]// CANS 2007. LNCS 4856, Berlin; Springer-Verlag, 2007; 194-208
- [45] Samreen A, Ansari S. Certificateless ID-based Authentication using Threshold signature for P2P MANETs[A]// 2009 Information and Communication Technologies[C]. ICICT, 2009; 112-116
- [46] 张彬连. 基于簇结构的分布式认证和密钥管理机制研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2007; 16-18
- [47] Venkatraman L, Agrawal P D. A novel authentication scheme for Ad Hoc Networks[J]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2000, 3: 1268-1273
- [48] Bechler M, Hof H J, Kraft D, et al. A cluster-based security architecture for Ad Hoc Networks[C]// Proc of the 23rd IEEE INFOCOM'04. Hong Kong, China, 2004, 4: 2393-2403
- [49] Li G S, Han W B. Cluster-Based key management in Ad Hoc Networks[J]. Computer Science, 2006, 33(2): 79-82
- [50] 李涛. 移动 Ad-hoc 网络的安全性及密钥管理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007; 41-56
- [51] Boyen X. Multipurpose Identity-Based Signer crypton: A Swiss Army Knife for Identity-Based Cryptography[C]// Crypto'03, Lecture Notes in Computer Science 2729. Berlin; Springer-Verlag, 2003; 383-399
- [52] 吴旭光, 张敏情, 杨晓元, 等. 一种无证书的移动 Ad hoc 网络密钥管理方案[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(21): 74-76
- [53] Lee D G, Kang S I, Seo D H, et al. Authentication for single/multi domain in ubiquitous computing using attribute certification[A]// International Conference on Computational Science and Its Applications[C]. UK, 2006; 326-335
- [54] 王俊, 张红旗, 张斌. 新的基于角色的跨信任域授权管理模型[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(8): 106-109
- [55] 樊蕊. 跨域身份认证系统的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007; 27-36
- [56] 姜奇, 马建峰, 李光松, 等. 基于身份的异构无线网络匿名漫游协议[J]. 通信学报, 2010, 31(10): 138-145
- [57] Yao L, Wang L, Kong X W, et al. An inter-domain authentication scheme for pervasive computing environment [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2010, 59(2): 811-821
- [58] 彭华熹. 一种基于身份的多信任域认证模型[J]. 计算机学报, 2006, 29(8): 1271-1281
- [59] Chan Y Y, Fleissner S, et al. Single sign-on and key establishment for ubiquitous smart environments [A] // International Conference on Computational Science and Its Applications[C]. Glasgow, UK, 2006; 406-415
- [60] Forne J, Hinarejos F, Marina A, et al. Pervasive authentication and authorization infrastructures for mobile users [J]. Computers & Security, 2010, 29(4): 501-514
- [61] 罗长远, 霍士伟, 邢洪智. 普适环境中基于身份的跨域认证方案[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 111-115, 122