

基于桌面网格技术的高能物理计算系统

阚文泉^{1,2,3}, 王 聪^{1,2}, 徐 琪^{1,2}, 杜 然^{1,2}, Andrei Tsaregorodtsev³, 陈 刚¹

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 法国科学院 马赛粒子物理研究中心, 法国 马赛 13009)

摘 要: 针对传统的集群计算资源无法满足高能物理计算中对于海量数据处理的需求, 基于桌面网格技术提出一种新型高能物理计算系统。该系统通过虚拟化技术, 实现高能物理计算在桌面网格上的应用部署, 并且设计镜像元数据服务进行远程镜像库管理。根据高能物理计算的特点, 实现以 DIRAC, BOINC, 3G-bridge 为基础的新型桌面高能物理计算系统。系统以 BOINC 计算服务为基本框架, 3G-bridge 处理作业请求, DIRAC 提交计算作业。测试与分析结果表明, 该系统能对高能物理作业提供稳定高效的计算服务, 计算结果可靠, 具有高可扩展性。

关键词: 高能物理计算; 桌面网格; 虚拟化; 镜像元数据; DIRAC 平台; 3G-bridge 服务; BOINC 系统

中文引用格式: 阚文泉, 王 聪, 徐 琪, 等. 基于桌面网格技术的高能物理计算系统[J]. 计算机工程, 2016, 42(6): 48-54.

英文引用格式: Kan Wenxiao, Wang Cong, Xu Qi, et al. High Energy Physics Computing System Based on Desktop Grid Technology[J]. Computer Engineering, 2016, 42(6): 48-54.

High Energy Physics Computing System Based on Desktop Grid Technology

KAN Wenxiao^{1,2,3}, WANG Cong^{1,2}, XU Qi^{1,2}, DU Ran^{1,2}, Andrei Tsaregorodtsev³, CHEN Gang¹

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center for Particle Physics of Marseille, The National Center for Scientific Research, Marseille, France 13009)

[Abstract] Traditional cluster computing resources can only partly meet the demand for massive data processing in high-energy physics. A high-energy physics computing system is proposed based on desktop grid technology. The system uses virtualization technology to deploy high-energy physics data processing on it, and designs image metadata service, and manages remote image database. The computing system is built on the technologies of DIRAC, BOINC, and 3G-bridge. Among them, BOINC is used to provide a new platform of computing resource, 3G-bridge is used to handle job requests, and DIRAC is used for job submission. Test and analysis results show that the new system is stable, reliable and efficient for data processing with good computing performance and scalability.

[Key words] high energy physics computing; desktop grid; virtualization; image metadata; DIRAC platform; 3G-bridge service; BOINC system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.06.009

1 概述

在大数据科研时代、大科学与工程领域, 如高能物理、生物基因工程、卫星遥感等, 都面临科研数据的爆炸式增长。海量的数据处理对于计算资源的需求越来越多, 而传统的计算资源已经无法满足。高能物理作为科学计算中的一个重要领域, 每年能够产生几十 PB 的数据量。例如, 欧洲核子研究组织 (European Organization for Nuclear Research, CERN) 的大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 是

目前世界上能量最高的粒子加速器, 花费 100 亿美元, 工程耗时近 10 年。LHC 目前主要有 4 个实验: ALICE, ATLAS, CMS 和 LHCb, 一年所产生的原始数据约为 25 PB。即使相对规模较小的位于中国科学院高能物理研究所的北京正负电子对撞机 II (Beijing Electron Positron Collider, BEPC) 和北京谱仪 III (Beijing Spectrometer, BES) 实验, 在历经了 2 次改造升级后, 数据增长速度提高了几十倍, 在过去几年内, 数据累积也超过 5 PB。高能所还在运行和建设其他的国内外知名的物理实验, 如羊八井宇

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11375221, 11305192, 11205179, 11405195); 中国科学院“十二五”科研信息化基金资助项目“高能物理科技领域云” (Y2293C00S5)。

作者简介: 阚文泉 (1987-), 男, 博士研究生, 主研方向为分布式计算; 王 聪、徐 琪、杜 然, 博士研究生; Andrei Tsaregorodtsev, 高级工程师; 陈 刚, 研究员、博士生导师。

收稿日期: 2015-05-12 **修回日期:** 2015-06-11 **E-mail:** kanwx@ihep.ac.cn

宙线观测实验、大亚湾中微子实验、大型高海拔空气簇射 LHAASO 实验等,这些实验预计在未来几年内会产生几十 PB 的数据量。为了能够处理这样的海量数据,科研工作者致力于寻求各种各样的可用的计算资源,包括超级计算机、集群计算、网格计算以及云计算等。而利用桌面网格计算技术整合桌面电脑空闲 CPU 时间所提供的具有强大潜在计算能力的计算资源也越来越受到科学家的关注。

高能物理实验中对于实验数据处理有着不同的作业类型,大体上分为计算密集型作业和数据密集型作业,这些作业对于计算节点也有着不同的需求。由于桌面网格由低优先级的公共桌面计算资源组成,再考虑到公共计算机的网络带宽因素,传统的桌面网格更适用于如蒙特卡洛模拟等计算密集型的应用。由于对计算资源稳定性、安全性、可控性等方面的考虑,以及针对高能物理计算的特点,本文所设计的桌面网格所使用的计算节点由学校内部局域网中的计算机组成,也称之为校园网格。由于在局域网环境中,无需考虑带宽等因素,因此适用于数据密集型的高能物理计算。

文献[1]基于对志愿计算的网路拓扑框架的研究,分析了当前志愿计算类型主要分为4种:C/S模式,基于对等模式,基于代理或基于代理网络模式和层次化网络拓扑架构,并在其他关键技术进行了研究,如任务调度、应用编程模型等。

基于 C/S 模式的桌面网格技术,主要的平台有 BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing)^[2], SuperWeb^[3], XtremWeb^[4] 等,其中 BOINC 是目前最广泛使用的计算平台。

目前主流的计算平台 OurGrid^[5]以及文献[6-8]提出的桌面网格架构是基于 P2P 对等模式的相关研究,并在此基础上提出了非结构化的对等网络拓扑及混合式非结构化的桌面网格计算平台。

文献[9]提出了基于 BOINC 平台的层次化的桌面网格技术,该系统把网络中的不同站点进行层次化管理,并设计父子工程进行管理,具有良好的扩展性,不过该架构存在部署难及通用性差等问题。

本文介绍并分析了高能物理计算的特点。为给高能物理计算提供稳定的、安全的计算资源,利用开放式网络计算平台 BOINC 集成高能物理资源管理工具 DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control)^[10]和 3G-Bridge (Generic Grid-Grid Bridge)^[11]框架,实现了一个具有高并发计算能力的高能物理计算平台,并且使用 BESIII 高能物理实验作业进行了初步的可用性测试。

2 背景介绍

2.1 BESIII 实验数据处理过程

高能物理对于实验数据的处理主要分为模拟、

重建及分析等过程,从而产生相对应的作业类型。在 BESIII 实验中,微观粒子经过粒子加速器加速对撞后所产生的信息经过传感器的获取及筛选后被传送到离线系统中进行存储,这些数据即为原始数据。原始数据由事例组成,这些事例首先通过重建后产生的数据被保存成为 DST (Data Summary Tapes) 文件,再进行数据分析工作,通过使用模拟软件如蒙特卡洛模拟软件生成与原始数据相当规模的模拟数据,经过相同的重建、分析等处理后,进行结果验证。图1描述了 BESIII 实验数据处理流程。

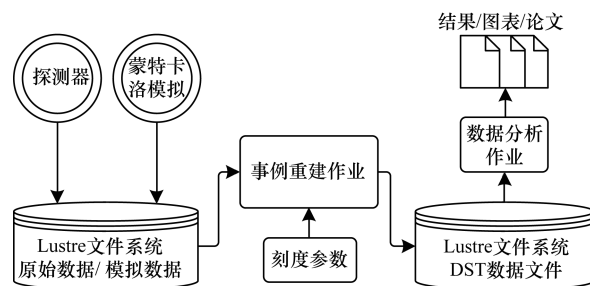


图1 BESIII 实验数据处理流程

2.2 BOINC 分布式计算平台

由加州大学伯克利分校电脑系于2003年设计用于志愿计算项目 SETI@home^[12]的分布式计算系统 BOINC,是目前主流的分布式计算平台之一。它采用桌面网格技术,整合志愿者的计算机空闲 CPU 时间,为科学计算提供计算服务。目前,BOINC 已经应用于许多领域,包括数学、医学、天文学、气象学、生命科学等。

BOINC 采用中心服务器基于 C/S 模式的框架,BOINC 框架如图2所示。服务器端面向发起项目的科学工作者,进行作业实例化、作业调度、响应客户端请求、维护志愿者机器信息等;客户端面向志愿者,进行作业运算及结果上传。在 BOINC 的框架中,一般采取对比验证策略进行结果验证,结果验证器是面向应用的,随着应用的不同而有所不同。

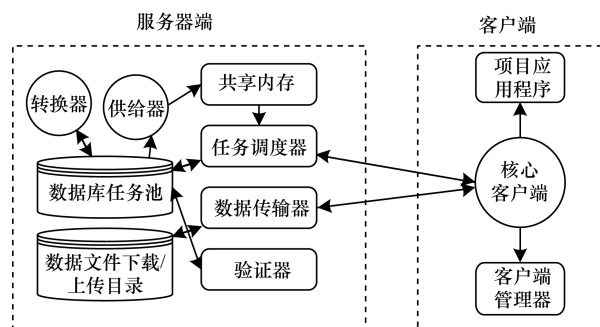


图2 BOINC 框架数据流

3 系统设计与实现

通过调研工作,本文开发了一种新的系统框架,使用 DIRAC 服务提供用户接口面向用户,同时包括用户管理、证书管理、作业管理、作业状态监控等功能;使用 3G-bridge 服务处理作业请求,将作业请求转

化为 BOINC 的任务单元,BOINC 用于任务的调度及计算资源的管理。基本框架如图 3 所示。

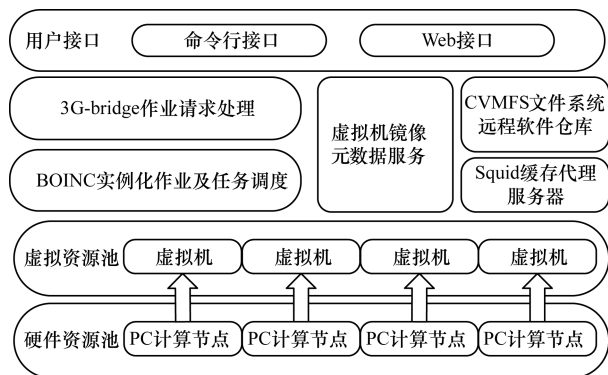


图 3 高能物理计算桌面网格架构

本文系统使用校园局域网内部的 PC 机为计算节点,通过虚拟机镜像元数据服务器部署虚拟池,构建虚拟化环境,从而解决了异构计算资源整合的问题,提高了系统的通用性及易化了应用部署,采用文件系统 CVMFS^[13] 及缓存代理服务 Squid^[14],使用镜像与软件分离的方式进行镜像管理。这种方式虽然在单个作业上牺牲一定的运行时间,但却能够满足多种作业类型的软件需求,并且能够节省一定的网络带宽及计算节点的资源占用。而采取缓存代理服务,能够在一定程度上弥补在缓存软件阶段所产生的时间开销。

3.1 DIRAC 服务与 3G-bridge 服务的集成

基于已有的系统 DIRAC 与 3G-bridge 实现作业处理过程,DIRAC 是一个网格中间件,为用户提供了一个完整且简单的访问各种资源的方法,对于用户是完全透明且可信的,用户不用关心后台的计算资源类型。DIRAC 实现了一个很好且可信赖的交互过程,并且提供了完整的用户角色管理、证书管理、作业接口、作业信息监控等服务。虽然 BOINC

也提供了基于 SOAP 协议的接口,而在本文系统中并没有采用直接集成 DIRAC 和 BOINC 服务,主要的原因有 2 点:(1)虽然 2 种接口都易于开发,但相对于 SOAP 协议接口并没有提供认证机制,本文系统采用了 3G-bridge 提供基于 REST 的交互接口,能够实现认证机制,这对于高能物理计算要保证高度的安全性方面是至关重要的。(2)3G-bridge 同时也提供了各种网格中间件的访问方法,其中包括 BOINC,这样在以后对于整个系统的扩展性方面会有很大的改善,即除了能够整合桌面计算资源,本文的系统还能够同时管理集群资源,甚至云计算资源。

通过接口的开发,3G-bridge 作为一个计算单元 (Computing Element, CE) 面向 DIRAC 服务,当 DIRAC 作业管理系统 (Workload Management System, WMS)^[15] 在管理作业队列时,会同时扫描其所管理的所有的计算单元 (CE) 代理器,根据一定的调度策略扫描到合适的 CE,启动所选择的 CE 代理器,向该 CE 发送任务。当 3G-bridge 接收到任务后,将任务转化成 BOINC 任务单元,通过网格接口发送给 BOINC,在本文系统设计时,将 3G-bridge 和 BOINC 部署在同一台服务器,并且将它们的任务池用同一个数据库进行维护,这样可以在一定程度上减少通信时间。BOINC 在接收到任务后,将任务放入任务池中等待处理,客户端接收到任务后,根据任务的需求,从本地镜像库或使用远程镜像元数据服务,下载镜像,若客户端已经存有所需镜像,则无需下载。此后,客户端使用虚拟机控制程序进行启动虚拟机,利用虚拟机管理程序 Virtualbox^[16] 的共享文件夹功能,使得虚拟机与宿主机之间进行文件共享,此时虚拟机读取作业输入文件,启动代理服务 (pilot),与 DIRAC 的作业匹配器 (Matcher) 服务进行交互通信,从而获取真正的物理作业,运行作业完毕后将作业结果进行上传。作业数据流如图 4 所示。

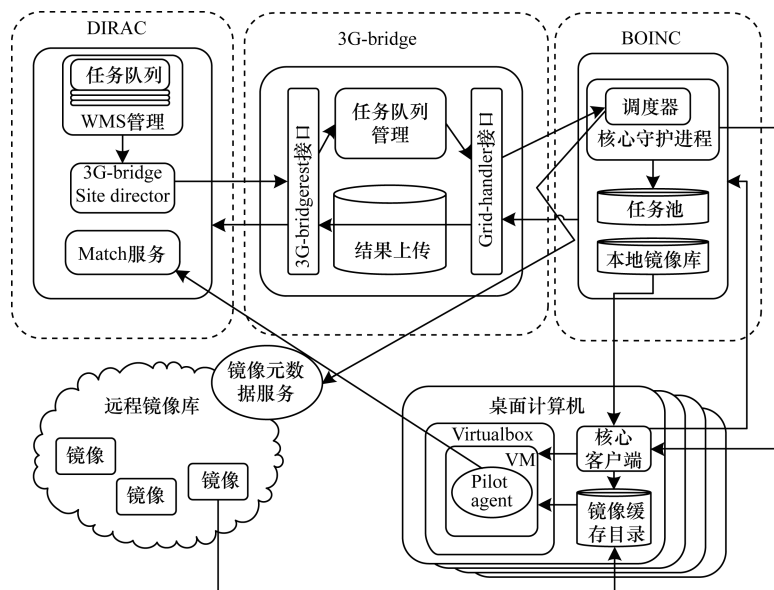


图 4 作业数据流

3.2 远程镜像元数据服务

由于高能物理计算作业及用户的多样性,不同的作业类型或者不同的用户,对于镜像都有着不同的要求,如镜像操作系统等。系统管理者所提供的镜像类型显然不能够满足所有要求。

通过应用程序编程接口 API 的开发,可以将镜像的元数据信息语义化,并使用可扩展标记语言(XML)格式保存起来,即为镜像元数据文件,该文件信息包括镜像文件的基本信息,即镜像的大小、操作系统、内核型号等;该文件将会上传到镜像元数据服务器中。

当用户使用 API 语义化镜像的元数据信息后,会得到一个唯一的标识符来标识镜像元数据文件,该标识符在用户提交作业时,服务器在元数据服务器中解析得到镜像元数据信息的唯一标识。

对于镜像的处理,由于在系统中,所有的用户都是通过证书认证的用户,因此给了用户更大的自由度,如用户可以选择将镜像上传到系统所提供的远程镜像仓库,这样便于镜像的长期处理和保存,另外,用户同样可以将镜像放置在任何可以合法下载的地方。

当 BOINC 在接受并处理来自 DIRAC 服务器的作业请求时,首先会利用镜像标识符进行镜像元数据解析,进而获得所需的镜像元数据信息,镜像的原数据通过 XML 文件格式存储于镜像元数据服务器中,通过开发运行在 BOINC 服务器的守护进程,该进程在处理作业调度时,会根据作业参数读取镜像标识,通过标识与镜像元数据服务器通信,解析 XML 文件信息,获得镜像的下载路径、MD5 值、大小 3 个元素,用于客户端读取,从而获取镜像,此服务也同样适用于输入文件。

镜像元数据文件内容格式定义(部分节选)如下:

```
<slreq:bytes>1478533120</slreq:bytes>
<slreq:checksum rdf:parseType="Resource">
<slreq:algorithm>MD5</slreq:algorithm>
<slreq:value>492b5e9a6a3fe147963d2cb45b4
caefd</slreq:value>
</slreq:checksum>
<slterms:os>ScientificLinux</slterms:os>
<slterms:os-version>5.5</slterms:os-version>
<slterms:os-arch>X86_64</slterms:os-arch>
<slterms:version>Linux26</slterms:version>
```

客户端在进行作业运算前,通过从 BOINC 端获取到的镜像元数据信息与本地已有的所有镜像进行对比,若已经存在该镜像,则不会重新下载,这样也避免造成资源浪费。镜像元数据服务框架如图 5 所示。

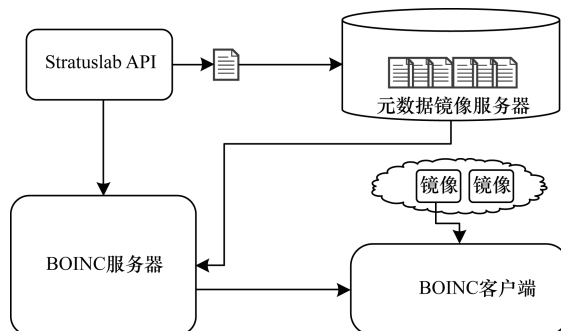


图 5 镜像元数据服务框架

通过同时提供远程镜像元数据服务及本地镜像服务,系统在可用性上有了很大的提高,能够更好地满足不同用户的计算环境需求,也在可用性、扩展性等方面对系统进行了整体的优化提升。

3.3 自适应资源调配机制

由于本文系统在处理高能物理作业时采取虚拟化技术,因此考虑到单个计算资源的有限性能,或者考虑到系统是否能够对于计算资源进行最大化合理使用,即在不影响作业运行效率的情况下,使用最少的计算资源,比如采取最合理的虚拟机尺寸、内存大小、CPU 个数等因素。所谓最大化的合理使用并不是无节制最大化地使用计算节点,因为本文所使用的是志愿者计算节点的 CPU 空闲时间,在不影响志愿者对于计算机使用的同时,最大化地利用计算节点的 CPU 空闲时间,即在合理的情况下,最大化地实现单个计算节点的计算性能是在设计系统时所要考虑的重要问题。

自适应资源调配机制的设计,是用于 BOINC 服务器在接收新的作业应用时进行同等队列测试,从而获得一个合理的临界虚拟机配置参数,在 BOINC 服务器端处理新应用时,会先在服务器端使用本地 standalone 模式进行不同配置参数的队列测试,standalone 即为模拟客户端进行作业运算,由于在高性能物理计算中,网络带宽和内存大小是影响作业运行的主要因素,因此在自适应调配机制中主要获得最合适的内存参数。

当 BOINC 服务器接收到来自 DIRAC 的新应用作业请求时,会自动定制化地在服务器端启动一个 standalone 模式的队列进行作业运算,队列中的每个作业使用不同的配置参数,如采用内存为 256 MB, 512 MB, 768 MB, 1 GB 的参数设置,然后对比作业运行进度,由于物理作业对于内存的要求比较敏感,当内存值低于某一个临界值时,作业运行效率会明显下降,这个临界值便是所需的合适的参数。

可以将参数设置一个比较富余的数值,这样就可以保证所有的应用都能够运行,但并不能满足所有的应用需要,这样会影响计算机使用者的体验,并且造

成资源浪费。自适应的调配机制不仅可以合理使用计算资源,而且可以在一定程度上减少管理者的工作量。自适应资源调配机制的作业队列如图 6 所示。

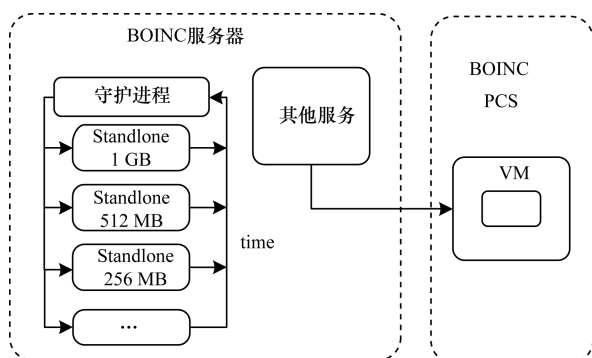


图 6 资源分配测试队列

3.4 基于虚拟化技术的通用应用控制程序

传统的桌面网格往往都有着应用部署难的问题,面对不同的应用,都要提供相应的程序控制程序,这样不仅增加了开发者的工作量,而且往往都是重复的工作,本文系统在设计时,考虑到系统的通用性,设计了面向使用虚拟机的通用应用控制程序。

基于虚拟化技术的通用应用控制组件主要由如图 7 所示的组件组成:虚拟机控制程序,虚拟机环境配置文件,虚拟机镜像,应用控制程序,输入文件,输出文件。

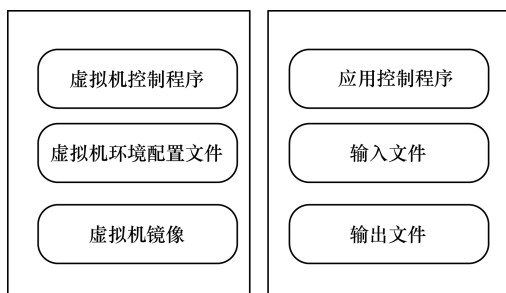


图 7 通用应用控制组件

(1) 虚拟机控制程序。该程序用于控制虚拟机的整个生命周期,包括虚拟机环境配置和启动阶段、对运行阶段的虚拟机状态和服务器的交互以及虚拟机的关闭阶段等。由于计算资源的优先级较低,则采用 checkpoint 机制实现虚拟机断点控制,用于控制作业的再次唤起。虚拟机控制程序通常由 BOINC 项目组提供,也可以根据实际的作业需求自行编译,本文系统所使用的是由 BOINC 所正式发布的版本。

(2) 虚拟机环境配置文件。输入文件及输出文件是通过服务器端获取,对于每个应用,作业类型的运行参数一致,所以在通过自适应调配策略后,每个应用的合理环境参数都会存储在服务器端供客户端使用,而且对于输入输出文件则是应用作业运行时所需要的实际文件,可以用远程镜像服务获取也可

以通过 DIRAC 系统上传。

(3) 通用应用控制程序。主要是用来控制在虚拟机内部的应用程序,其工作流程是:客户端在接收到任务之后,会根据虚拟机环境配置文件配置环境并启动虚拟机控制程序,从而启动虚拟机,将输入文件包括应用程序,通过共享文件目录机制,拷贝到共享目录,供虚拟机读取,虚拟机启动时自动启动应用控制程序,进行作业计算,产生的输出文件也将放入共享目录供客户端上传。

对于应用程序控制程序是面向应用的,在桌面网格中,通常要为不同的应用程序量身订制,这样不仅加大了应用部署的难度,也降低了系统的通用性。本文提供了一种使用应用程序统一命名方法,当不同的作业类型使用了统一命名规则对输入文件、输出文件、应用程序进行统一命名时,在客户端的虚拟机内部,通用应用控制程序会自动通过命名规则识别应用程序及输入输出文件,自动运行作业,这样不仅减小了应用部署的难度,并且增强了系统的通用性,在移植新应用时,使用统一命名规则,则可以直接部署到系统上。

4 系统可用性评估测试与分析

由于系统所使用的计算节点为校园局域网内部的桌面计算资源,在单个计算节点上面存在着一定的局限性,这些低优先级资源在运行单个作业时存在着不可控的因素,如内存、CPU 的使用有限,即计算节点在供给系统使用时并不能影响志愿者对于计算节点的正常使用。并且在使用桌面电脑运行单个作业需要下载镜像、启动虚拟机等动作也会产生一些时间消耗,这些因素导致在单个作业的运行效率和可控上面无法与传统的集群节点对比,考虑到目前的集群节点资源投入有限,而桌面网格存在着高度的可扩展性和无可限量的潜在的計算能力,所以从整个性能上面及长远的发展来看,本文系统的计算能力将远远超过集群资源。

系统的实现基于 DIRAC v6r10, BOINC 6.11.1, 3G-bridge 1.9 开发,服务器采用 X86 架构服务器, Scientific Linux 32 位操作系统,其硬件配置为:4 × 2.27 GHz CPU、24 GHz 的内存、千兆以太网、6 × 300 GB 的 SATA 硬盘。测试节点为 6 台 X86 志愿者计算节点,采用的操作系统分别为 2 台 Windows 7 64 位操作系统,其硬件配置为:4 × 3.10 GHz CPU, 4 GB 内存,千兆以太网卡,300 GB 的 SATA 硬盘,2 台 OS X 10.9.5 64 位操作系统,其硬件配置为:2 × 2.6 GHz CPU, 8 GB 内存,千兆以太网卡,128 GB 的 SSD 硬盘,2 台 Scientific Linux 64 位操作系统,其硬件配置为:6 × 2.00 GHz CPU, 12 GB 内存,千兆以

太网卡,1 TB 的 SATA 硬盘。

系统评估采用真实的 BESIII 实验数据处理,运行真实的模拟作业作为测试作业,图 8 为一批 60 个模拟作业,共 600 000 个事例,依次增加计算节点数,计算结果表明该系统具有良好的扩展性,且加速度稳定,并且在使用不同操作系统计算节点运行的作业全部通过验证,表明本文系统在运行作业时,能够提供正确的运行结果,并且在整合使用异构系统的计算节点后也表现出良好的稳定性。

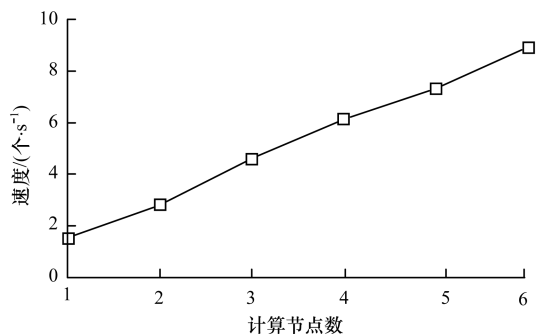


图 8 事例分析速率图

图 9 为在实际生产系统中,本文系统与 DIRAC 服务的其他 CE 之间的对比,为每处理 10 000 个事例单个计算节点所用的时间,并且选择了拥有在高性能所 DIRAC 服务中最快处理速度的集群计算单元和新加入云平台计算单元进行对比,结果表明,本文

系统具有稳定性,并且在单个节点的处理速率方面要优于云平台计算单元。

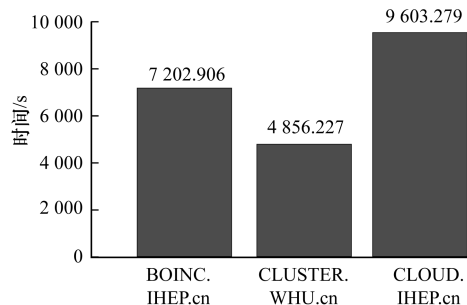
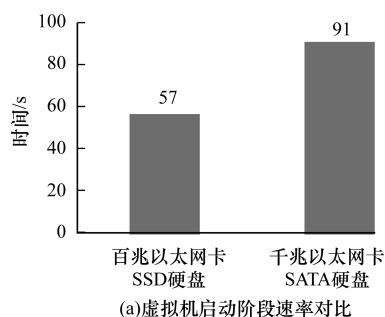
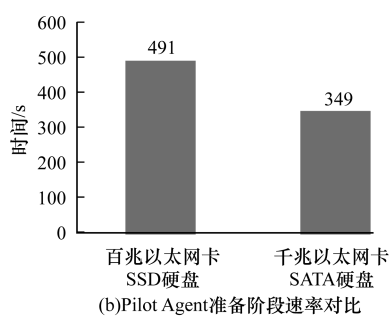


图 9 不同计算单元事例处理速率对比

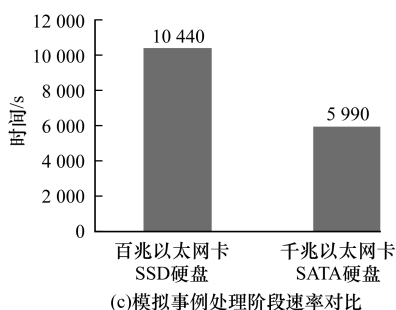
通过图 9 的实验结果表明,系统中每个计算节点在处理 10 000 个模拟事例的时间为 7 202 s 左右,而在图 8 的实验中所得到的数据为单个节点处理 10 000 事例为 6 200 s 左右,速度要优于实际的生产系统,在实际的生产系统中,计算节点多种多样,规格与计算能力也有所差别,图 10 为在处理事例过程中的影响因素分析,通过实验可以看出,网络带宽为主要影响因子,由于在处理事例过程中,模拟事例分析阶段占用了整个处理过程 90%,由于在该阶段要使用到 CVMFS 服务,因此网络带宽在处理过程中表现出明显差异,而对于硬盘格式,主要影响在虚拟机准备与关闭阶段,影响并不大。



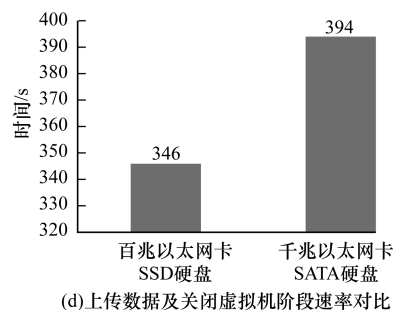
(a)虚拟机启动阶段速率对比



(b)Pilot Agent 准备阶段速率对比



(c)模拟事例处理阶段速率对比



(d)上传数据及关闭虚拟机阶段速率对比

图 10 影响因素分析

5 结束语

本文基于桌面网格技术,结合高能物理计算的特点,研究设计一个新型高能物理计算框架,在此基

础上设计实现了一个高效可靠、具有高可扩展性的高能物理计算平台。并且通过测试结果表明,该系统在进行物理作业运行时,作业结果无差异,稳定性表现良好;在桌面技术框架下,系统表现出良好的可

扩展性;系统在镜像服务、应用部署方面能够支持多用户及多种作业类型,表现出良好的通用性。

目前,该系统已经正式用于生产系统,运行稳定,在未来的工作中,将在系统的可用性、通用性及作业运行效率方面进行整体优化,如在面向多应用的群智能分布式调度算法及基于不同任务类型的作业调度模型等方向进行研究,提高系统运行效率。

参考文献

- [1] 徐胜超. 志愿者计算模型的研究进展[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(8): 1530-1537.
- [2] Anderson D P. BOINC: A System for Public-resource Computing and Storage [C]//Proceedings of the 5th IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing. Pittsburgh, USA: IEEE Press, 2004: 216-222.
- [3] Ibel A, Schauser M. Superweb: Towards a Global Web-based Parallel Computing Infrastructure [C]//Proceedings of the 11th International Parallel Processing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1997: 100-106.
- [4] Fedak G, Germain C, Neri V, et al. Xtrem Web: A Generic Global Computing System [C]//Proceedings of the 1st IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001: 582-587.
- [5] Walfredo C, Francisco B, Nazareno A, et al. Labs of the World, Unite!!! [J]. Journal of Grid Computing, 2006, 4(3): 225-246.
- [6] 张学锋, 徐胜超. 基于混合式非结构化对等网络的桌面网格平台[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(7): 41-45.
- [7] Dou Wen, Jia Yan, Wang Huaimin, et al. The Construction of a Generic Large Scale Computation Sharing Environment Based on Peer to Peer Overlay Network [J]. Chinese Journal of Computer, 2004, 27(1): 21-31.
- [8] 韦文代. 基于非结构化对等网络的分散式桌面网格平台[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(1): 92-95.
- [9] Marosi A, Gombas G, Balaton Z, et al. Sztaki Desktop Grid: Building a Scalable, Secure Platform for Desktop Grid Computing [EB/OL]. (2008-10-21). http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-0-387-78448-9_29?LI=true.
- [10] Tsaregorodtsev A, Bargiotti M, Brook N, et al. DIRAC: A Community Grid Solution [EB/OL]. (2011-12-15). http://iopscience.iop.org/1742-6596/119/6/062048/pdf/1742-6596_119_6_062048.pdf.
- [11] Peter K, Jozsef K, Zoltan F, et al. SZTAKI Desktop Grid (SZDG): A Flexible and Scalable Desktop Grid System [J]. Journal of Grid Computing, 2009, 7(4): 439-461.
- [12] Javadi B, Kondo D, Vincent J M, et al. Mining for Statistical Models of Availability in Large-scale Distributed Systems: An Empirical Study of SETI@Home [C]//Proceedings of the 17th Annual Meeting of the IEEE/ACM International Symposium on Modelling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. London, UK: IEEE Press, 2009: 326-333.
- [13] Buncic P. CernVM——A Virtual Software Appliance for LHC Applications [EB/OL]. (2014-12-15). http://iopscience.iop.org/1742-6596/219/4/042003/pdf/1742-6596_219_4_042003.pdf.
- [14] Squid [EB/OL]. (2014-12-15). <http://wiki.squid-cache.org/>.
- [15] Casajus A, Graciani R, Paterson S, et al. DIRAC Pilot Framework and the DIRAC Workload Management System [J]. Journal of Physics, 2010, 219(5).
- [16] Virtualbox [EB/OL]. [2015-04-21]. <http://www.virtualbox.org/>.

编辑 索书志

(上接第 47 页)

- [3] Object Interface Systems. ORBExpress [EB/OL]. [2015-07-25]. <http://www.ois.com/Products/communications-middleware.html>.
- [4] PRISMTECH. Vortex the Intelligent Data Sharing Platform for the Internet of Things [EB/OL]. [2015-07-25]. <http://www.prismtech.com>.
- [5] Schmidt D C. The ACE ORB [EB/OL]. [2015-07-25]. <http://www.cs.wustl.edu/~schmidt/TAO.html>.
- [6] 李方, 张虹. GIOP 协议和 CORBA 的性能优化 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(21): 7-10.
- [7] 鲁波, 邹华, 王柏. CORBA 性能分析及优化 [J]. 计算机工程, 2001, 27(9): 3-4.
- [8] 欧阳伟. CORBA 中间件协议层优化研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [9] 黄海峰. CORBA 的通信机制及性能研究 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 38(23): 157-159.
- [10] JTRS JPEO. SCA 4.0 Software Communications Architecture [EB/OL]. [2015-07-25]. <http://www.prismtech.com/spectra/technologies/sca-40>.
- [11] 蔡卓, 张小琼. SCA 4.0 规范概述 [J]. 通信技术, 2013, 46(7): 126-128.
- [12] 李雅萍, 杨尚森, 李阳. CORBA 技术在 SCA 系统中的应用 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(16): 4200-4203, 4206.
- [13] 郑学强, 林红君, 郭玉东. CORBA 实现中的优化技术研究 [J]. 微计算机信息, 2005, 21(8): 101-103.
- [14] 万亚平, 曾致远. CORBA 设计中的性能分析 [J]. 微机发展, 2004, 14(8): 55-57.
- [15] 廖文瑜, 刘文斌, 苏畅, 等. 基于分布式 SCA 应用的 CORBA 性能分析 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(5): 524-528.
- [16] 潘荣. ACE 技术内幕 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

编辑 陆燕菲