

高能物理计算环境概述

程耀东, 石京燕, 陈刚

中国科学院高能物理研究计算中心 北京 100049

摘要: 本文首先介绍高能物理的计算需求, 然后探讨了典型的高能物理计算模型, 接着详细介绍了常用的计算技术和系统, 包括前端登录集群、海量存储系统、作业管理系统、虚拟计算系统、备份与分级存储、用户管理、软件自动部署、系统监视、网格系统等。最后, 对高能物理计算环境现状进行总结, 并提出展望。

关键词: 高能物理, 高性能计算, 海量存储, 网格

A survey of High Energy Physics Computing System

Yaodong Cheng, Jingyan Shi, Gang Chen

Computing Center, Institute of High Energy Physics, Beijing 100049

Abstract. This paper firstly describes the requirements of high energy physics computing, and then introduces a typical computing model. The paper mainly discusses the architecture and some popular technologies in high energy physics computing environment, including front-end login cluster, massive storage system, job management system, virtual cluster computing system, backup and hierarchical storage, user management, automatic software deployment, system monitoring and grid systems. Finally, the status and some prospects of high energy physics computing environment are summarized.

Key words: High Energy Physics, High Performance Computing, Massive Storage System, Grid Computing

引言

随着人类探索宇宙起源以及基本物质组成的脚步不断前行, 高能物理实验的规模也在不断扩大, 欧洲大型强子对撞机 LHC、北京正负电子对撞机 BEPCII、大亚湾以及江门中微子实验、羊八井国际宇宙线实验、高海拔宇宙线观测实验 LHAASO 等大型高能物理实验已经建成运行或者陆续建成, 这将累积越来越多的数据。比如, LHC 每年会产生 25PB 的数据, 采用网格计算模型进行全球分布式的处理与分析[1]。BEPCII 累积超过 5PB 的数据, 主要采用大规模计算集群进行分析。

这样的庞大的数据对高能物理计算环境提出许多新的挑战, 包括海量的数据存储能力、超强的计算能力、高速数据传输、大规模分布式的协同处理机制等。总体来说, 高能物理计算主要有如下需求:

首先, 高能物理的数据量巨大。随着新一代高能物理实验装置的建设完成, 实验规模不断扩大, 实验复杂性也不断增加, 数据产生量越来越大。目前, 全世界高能物理的实验数据已经达到 200PB, 并将很快超过 1000PB。

其次, 数据需求全球共享。比如, 全世界 8000 多位物理学家对 LHC 每年产生的 25PB 的实验数据进行分析。BEPCII 上的 BESIII 实验、大亚湾中微子实验等都是大型国际合作项目, 有着同样的需求。

最后, 高能物理中很多数据需要长期保存。比如, LHC 和 BESIII 实验的原始数据必须

保证在实验结束后至少 15 年以上的生命期内还可被利用。

海量数据存储与处理、全球数据共享以及长期保存等需求,需要有先进的计算环境支撑。当前高能物理领域普遍采用以高速网络为核心,基于存储集群和计算集群的分布式计算环境,并研究建设了全球分布式的网格系统等。随着云计算的发展,高能物理计算环境开始逐步采用虚拟化技术以及 Hadoop 数据处理等,呈现出网格与云计算结合的趋势。本文将对典型的高能物理计算环境及其组件进行介绍,并结合中国科学院高能物理研究所的实际计算环境,说明当前的高能物理计算技术发展状况与未来的展望。

1. 高能物理计算模式

1.1 数据处理过程

高能物理数据处理的主要过程如图 1 所示。探测器产生的原始数据保存到分布式存储系统中。原始数据非常宝贵,通常要做多份备份保存,并且一般不对最终用户开放。蒙特卡罗模拟程序根据理论物理模型以及探测器的特性,模拟产生数据。事例重建程序读取原始数据或者模拟数据,进行与探测器相关的重建,产生刻度常数与重建数据。重建数据对最终用户开放,用户使用物理分析程序读取重建数据,进行相应的数据分析与挖掘,产生物理成果,包括图表、论文等。

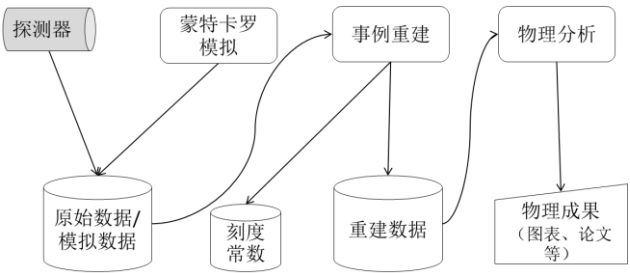


Fig.1 data process of high energy physics
图 1 高能物理数据处理过程

从图 1 中可以看出,高能物理数据处理主要包括模拟计算、重建计算以及物理分析三种类型。每种计算类型各有其特点,模拟计算需要很少的输入,主要消耗大量的 CPU 资源,产生大量数据。从探测器建设到运行,一直到产生物理成果,都离不开模拟计算,因此 CPU 需求量很大。事例重建用来处理探测器产生的原始数据与模拟计算产生的模拟数据,需要读入和写出大量数据,对 IO 和 CPU 需求都比较大,实时性要求比较高,因为该步骤是物理分析的基础。物理分析由最终用户,也就是物理学家发起,读取重建数据,进行数据处理和分析,这一步骤主要工作大都从海量重建数据筛选出稀有事例,对系统的 IO 要求很高。

1.2 典型计算模式

高能物理计算是典型的数据密集型应用,其计算特点是从海量的数据中挖掘出稀有事例。由于事例之间的无关性和独立性,物理学家往往把一系列的事例存储在一个文件中,多个文件可以在多个机器上被同时处理,而无需相互通信。因此,高能物理计算的特点是高吞吐率的数据并发,一般不采用 MPI 等并行计算技术。基于这些特点,目前高能物理领域普遍采用集群计算系统以及计算和存储分离的模式,典型的系统结构如图 2 所示。

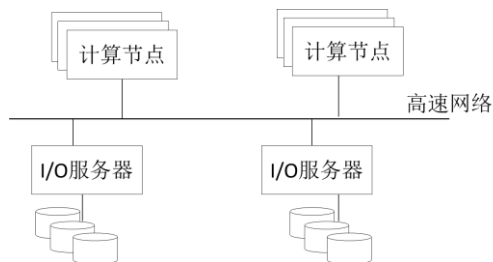


Fig.2 typical architecture of HEP computing system

图 2 高能物理计算系统典型结构

如图 2 所示，海量的实验数据存储于 I/O 服务器中，计算节点通过高速网络从 I/O 服务器中获取数据。多个 I/O 服务器通过分布式存储系统来管理，计算节点通过批处理作业系统来管理。

2. 高能物理计算环境

2.1 计算系统结构

典型的高能物理计算系统如图 3 所示，其核心是一个高速、高可靠的网络，其余子系统连接到这个核心网络上，包括前端登录集群、存储集群、计算节点集群、备份与分级存储系统、管理系统等。不同的子系统具有不同的功能和配置，功能上相互独立，整体上协同工作。

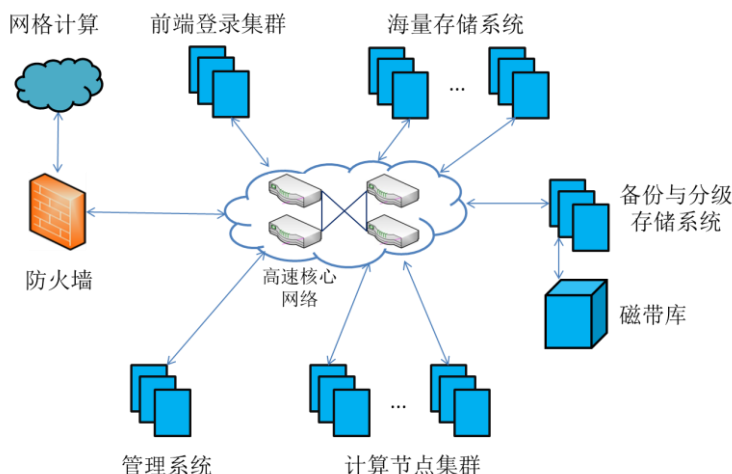


Fig.3 the components of HEP computing environment

图 3 典型的高能物理计算环境及其组件

2.2 前端登录系统

前端登录系统直接面向用户提供服务，后端的计算与存储等系统以虚拟资源池的形式通过前端系统展现给用户。前端系统通常与业务应用系统紧密联系，提供远程的登录服务、高性能计算服务、WEB 服务、海量存储接口等。对用户来说，前端登录系统就是一个单一入口点，后台实际上是能够动态扩展和负载均衡的集群系统。

高能所计算中心开发了基于 DNS 负载均衡的前端集群系统[2]，实现大规模用户登录服务，用户可从全球任何地方通过统一的机器名（比如 `lxslc.ihep.ac.cn`）登录到前端系统，进行数据文件检查，计算程序调试，分析作业提交等操作。成功登录前端系统后，用户即可获得使用后端高能物理计算环境的权限，包括海量存储、高性能计算系统、数据库等。

2.3 海量存储系统

高能物理计算通常使用计算和存储分离的模式。计算节点构成计算集群，通过高性能网络从存储系统中读取数据，计算过程中和计算结束后的结果再写回到存储系统中。存储系统一般采用集群结构，构成分布式海量存储系统。分布式海量存储系统通常有两种模式，一种是分布式文件系统，提供文件系统接口，直接挂载到计算节点上，计算任务就像访问本地文件系统一样存取数据，每个计算节点上的环境完全一致，包括统一文件系统视图。分布式文件系统采用比较多的是 GPFS[3]、Lustre[4]、Gluster[5]等。分布式存储系统的另一类模式为仅提供统一的文件系统视图和文件拷贝/传输命令，计算节点安装相应的存储系统客户端，每个计算任务通过拷贝/传输命令把需要处理的文件一次性拷贝到当前计算节点的本地磁盘上，后续的 I/O 操作只访问本地磁盘，不再与 I/O 服务器通信。这个模式的存储系统使用比较多的是 dCache[6]、CASTOR[7]、DPM 等。

笔者所在的中国科学院高能物理研究所主要采用分布式文件系统来构建高性能存储系统，其优点是很好地兼容了用户在早期 NFS 时代的使用习惯，应用程序和作业提交程序无需任何修改，但是在大规模分布式文件系统调优以及数据可靠性等方面则面临较大的挑战。高能物理研究所从 2006 年开始跟踪 Lustre 系统的发展，2008 年开始部署，目前拥有 3PB 以上的实际使用空间。其部署如图 4 所示。

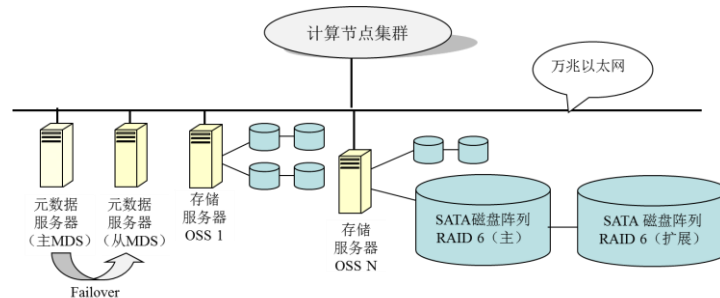


Fig.4 Lustre Deployment at IHEP

图 4 高能所 Lustre 部署图

高能所的 Lustre 部署有四个特点：a) 元数据服务器 MDS 分为主从，但是无法在线备份和容错；b) 采用万兆以太网；c) 没有采用分片存储，一个文件仅存储在一个 OST 上；d) 存储设备采用廉价的 SATA 盘，通过 RAID6 实现数据可靠性。

最近，高能所正在尝试基于 Hadoop MapReduce 构建高能物理数据分析系统[8]。这种架构中计算与存储协同工作，计算节点同时也是存储节点，任务在计算节点上执行时，直接从本节点读取数据，减少网络传输，在高并发的情况下能有效降低 I/O Wait 时间。

2.4 计算集群

高能物理计算环境中，通过作业调度软件将大量计算节点上的 CPU 资源整合起来，形成计算集群，对用户提单一系统映像。作业调度系统对多用户提交的任务进行统一安排，避免冲突，同时对用户访问资源进行授权。

高能物理领域常用的作业调度系统包括 PBS[9]、Condor[10]、LSF[11]、SGE[12]等。PBS 目前有 OpenPBS、PBS Pro 和 Torque 三个分支。OpenPBS 是最早的 PBS 系统，目前已经没有太多更新。PBS Pro 是 PBS 商业版本，功能最为齐全。Torque 是 Clustering 公司在 OpenPBS 基础上的开源版本，目前使用比较广泛。

Condor 是美国威斯康星大学开发的一套开源作业调度系统，专门支持高吞吐率计算 (HTC: High Throughput Computing)，提供作业排队、调度策略、优先级机制、资源监控和管理等功能。Condor 提出了著名的 ClassAd 机制，能够很好的匹配资源请求者 (作业) 与资源提供者 (机器) 之间需求。Condor 开发于 1988 年，在 2012 年改名为 HTCondor[13]。

LSF 是加拿大平台公司 (Platform) 开发的一个用来对分布式资源进行管理的工具。LSF

是一套功能全面的商业作业管理系统，提供基于智能的、策略驱动的调度策略，方便用户使用所有运算基础设施资源，适合要求高的分布式关键任务型高性能计算环境。LSF 平台具有高扩展性、高性能的特性，并提供追踪和实时监控能力，被高能物理界的很多单位使用，比如欧洲核子研究中心 CERN。LSF 在 2011 年被 IBM 收购，产品命名为 IBM Platform LSF。

SGE (Sun Grid Engine) 是由 SUN 公司一套开源的分布式资源管理软件，用来统一管理和利用所有计算节点上的资源，可轻松扩展。SGE 主要用在高性能计算、网格计算等领域。2009 年，SUN 被 Oracle 收购后，SGE 也称为 Oracle Grid Engine。SGE 有开源版本和商业版本。法国国家核物理及粒子物理研究院(IN2P3)目前在使用 SGE。

高能所的作业管理系统在 Torque 上进行二次开发，目前管理上万个 CPU 核的计算资源，支持数万个作业并发。同时，具有很好的可扩展性；支持任务拆分、调度、运行、结果合并、错误恢复等功能；自动屏蔽出错的计算节点；支持异构的资源接入，包括不同的服务器和 CPU、存储等，以及图形显卡 GPU 计算资源。

2.5 虚拟计算系统

随着集群规模的不断扩大，操作系统与应用软件的不断升级，CPU 等硬件性能的持续提升，传统的集群系统面临着资源利用率不高、应用迁移复杂、多应用支持困难等问题，而虚拟集群技术是解决这些问题的有效手段。虚拟集群基于虚拟机技术，在物理机器上虚拟出不同的操作系统以适应不同种类和不同版本的应用软件，同时在用户看来，仍然是传统集群的使用方法，用户也不必改变以前的使用习惯。

目前，高能所计算中心与欧洲核子中心 CERN 开展了虚拟集群项目的合作，在虚拟机性能测试与比较上取得了初步的结论[14,15]。其它的工作包括研究虚拟资源的管理与调度策略，开发虚拟集群管理系统，实现虚拟机的自动管理，包括分配、迁移、撤销、启动等操作，提供良好的接口，作业管理系统 PBS 等调用这些接口就可以实现队列资源的快速增长与收缩，从而大大提高系统资源的利用率和作业运行效率。由于对外仍然是 PBS 作业提交方式，用户感觉不到虚拟集群系统与原有系统不同，当然就可以透明的支持 WLCG 网格系统等。虚拟集群系统的结构如图 5 所示。

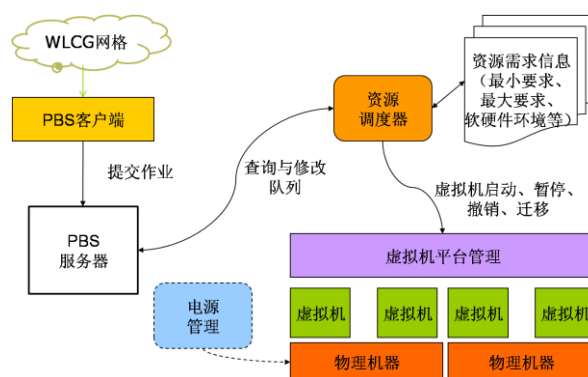


Fig.5 the architecture of virtual cluster computing

图 5 虚拟集群系统结构图

2.6 备份与分级存储系统

高能物理领域的数据量大，且要求长期保存，因此经常采用基于磁盘-磁带的分级存储系统。高能所基于 CERN 开发的 CASTOR1 系统，进行二次开发构建了自主的分级存储系统，将磁盘、磁带库等多种异构介质的存储设备整合起来，获取高性价比，同时利用多通路的并行数据访问特性，获得高性能和高通信带宽。为了达到使用户像使用本地文件系统一样地使用海量存储系统的目的，分级存储系统还构建了统一共享的文件名字空间。对于用户来说，磁盘和磁带上的数据都是在线的，可以随时访问。目前高能所的类型。

高能所的备份系统基于开源的 Amanda[16]进行二次开发，能够将重要的数据保存到磁

盘、分级存储系统甚至远端的云存储中，具有灵活的备份策略，支持全备份和增量备份；支持多机并行备份，速度快；支持 Linux、Windows 等多种操作系统，实现跨平台统一备份；支持加密备份和传输；支持 IPV6；自动屏蔽出错的机器；自动汇报备份结果。

2.7 用户管理

高能物理计算环境中拥有众多用户，从几十到上万不等，需要进行用户信息统一管理、统一认证以及统一 HOME 目录管理。高能物理领域常采用 AFS 文件系统管理用户目录[17]，配合 Kerberos 进行用户统一认证。通过用户统一管理，每个用户都可以把整个计算系统看作是单一的超级计算机。AFS (The Andrew File System) 是美国卡内基梅隆大学开发的一种开源分布式文件系统，它的主要功能是用于管理分布在网络不同节点上的文件。与普通文件系统相比，AFS 的主要特点在于三个方面：分布式、跨平台、高安全性。通过 AFS 共享用户的 HOME 目录，使得用户在任何一台登录节点或者计算节点都能看到完全一致的文件视图。AFS 支持 Windows 等多种操作系统。AFS 还是一种高安全性的文件系统。它通过鉴权数据库与 ACL 的配合为用户提供更高的安全性。即使是 Linux 操作系统的超级用户 root，如果没有用户的 AFS 的鉴权，也无法读取普通用户的设置安全属性的文件，更不能修改和删除了。但是，AFS 的数据访问性能不高，并不适合大量数据的存储和访问，一般用作用户 HOME 的共享。

2.8 软件自动部署

随着计算机集群规模的不断扩大，系统安装、配置和管理越来越复杂，需要有高效的、自动化的管理工具，实现集群系统中操作系统、应用软件的自动安装、升级和配置。高能所目前主要使用 CERN 开发的 Quattor 软件[18]，它能够根据模板定义进行自动的操作系统安装、IP 地址配置、磁盘分区、应用软件安装、软件自动更新升级等操作，完全达到“一键安装”的效果，能够在极短的时间内完成数千台机器的部署，是高能物理计算管理员不可或缺的帮手。最近，随着 puppet 开源社区[19]的成熟，高能物理开始转向 puppet 配置管理系统。puppet 通过使用自有的描述语言，可管理配置文件、用户、cron 任务、软件包、系统服务等。puppet 把这些系统实体称之为资源，puppet 的设计目标是简化对这些资源的管理以及妥善处理资源间的依赖关系。

2.9 系统监视

系统状态的实时监视和报警对系统运维至关重要。高能所基于 Nagios[20]等开源工具开发了网络与服务监视系统。采用插件架构实现，该系统支持面向用户特殊应用和特殊需求的监视对象功能开发和扩展，主要具有如下功能：网络拓扑实时显示；网络流量实时显示，并以不同的颜色进行区分；网络服务监视，例如：SMTP, POP3, HTTP, NNTP, PING 等；设备资源监视，例如：服务器负载，磁盘利用率，内存利用率等；广域网链路状况（丢包、延时监视）；系统、设备故障报警，支持 Email、声音、短信等报警模式；设备资源可用性、故障报告；基于 web 的网络拓扑变更和系统管理接口；多界面风格显示，支持 HTML 风格，JAVA 风格和 IPAD 界面风格。

2.11 网格系统

网络技术将全球地理上分散的计算资源有机的整合起来，协同工作，为大型科学实验研究提供计算支持，能够完成单个集群无法完成的大规模计算任务。网格系统由若干个站点组成，每个站点采用的技术与以上介绍的计算环境类似，也由本地的海量存储系统、计算集群、用户管理等部分组成。所以，计算网格也可以简单的理解为“集群的集群”。网格技术主要体现在：

第一，网格是一台超级计算机，拥有大量的计算资源与存储资源，用户可以透明使用。第二，通过网格，最大程度的实现任务调度与资源共享，在全球范围内合理的分配资源；第三，在共享资源的同时最大程度的保证网格资源的安全性。

目前, 网格技术已经成熟, 网格已成为高能物理、生物医学等领域科学家日常使用的计算基础设施, 发挥了极其重要的作用。全球高能物理网格 WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) [21] 是全球最大的网格系统。到 2013 年底, WLCG 将近 40 个国家和地区的 150 多个研究机构联合起来, 整合超过 25 万颗 CPU 的计算资源和超过 100PB 的存储资源。

高能所计算中心根据高能物理等学科的实际应用需求, 从 2001 年开始跟踪和研究网格技术, 目前建立了成熟先进的数据密集型网格计算平台, 并加入了世界上最大的网格系统 WLCG, 是全球 200 多个网格站点中运行水平最好的站点之一, 得到国际同行的好评。当前, 高能所建立良好的国内外网络链接, 包括从深圳大亚湾、西藏羊八井、东莞传输到北京的国内专用带宽, 每条链路 155Mbps; 从北京通过香港—西雅图之后到美国合作单位的国际链路, 独享带宽 622Mbps; 从北京经过伦敦到欧洲合作单位的另外一条国际链路, 共享带宽达到 5Gbps。网格站点每天与国际站点交换 TB 量级数据、处理数千个计算作业。

3. 总结与展望

为了满足海量数据存储、数据处理和分析、数据共享以及长期保存的需求, 高能物理领域一直走在计算技术应用的前列, 并建立了复杂的高能物理计算环境, 本文探讨了这些技术, 包括前端登录集群、海量存储系统、作业管理系统、虚拟计算系统、备份与分级存储、用户管理、软件自动部署、系统监视、网格系统等。但是, 随着高能物理实验的规模越来越大, 产生的数据量越来越大, 对计算技术和计算系统提出了更高的要求, 目前正与云计算、大数据等技术一起不断发展和融合。

为了实现更好的兼容性、灵活性、可维护性等功能, 全球高能物理领域正在开发和广泛使用虚拟化技术, 比如 CernVM[22]、LxCloud[23]等项目, 大大方便了高能物理应用在网格上的部署。还有项目, 比如 CLEVER[24]可以在 WLCG 网格的跨地域站点上虚拟出私有云, 统一管理。但是, 同时也要看到, 虚拟集群系统目前处于设计与原型开发阶段, 从应用的结果来看, 资源调度的均衡性、虚拟机迁移的实时性以及数据密集型应用在虚拟机上的执行效率等方面还存在一些问题, 需要在虚拟机调度算法、虚拟机性能优化等方面加大研究力度。

更大规模海量的数据, 给存储系统、高性能计算系统、网络传输以及细粒度运维等方面也带来了新的挑战, 目前高能物理领域也在 Hadoop、闪存及内存数据存储、openstack、SDN 以及运维数据关联分析等大数据技术方面展开研究, 以实现更大规模、更快速度、更高带宽的高性能计算环境并提供更细粒度运维服务。

总体来说, 传统高能物理计算环境主要采用存储与计算分离的批处理模式, 这种单一的模式在新的数据时代将受到挑战, 计算与存储相统一的 MR 模式已经出现, 基于内存计算的实时分析技术也正在被关注, 未来的趋势是根据用户的需求, 呈现分析模式的多元化。

参考文献

- [1] Ian Foster, Car Kesselman. The Grid 2[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004, 224-262.
- [2] 裴尔明, 孙功星, 石京燕, 等. 大规模用户登录服务的负载平衡实现[J]. 计算机工程, 2006, 32(8): 139-140.
- [3] Frank Schmuck and Roger Haskin, GPFS: A Shared-Disk File System for Large Computing Clusters, Proceedings of the Conference on File and Storage Technologies (FAST'02), 28-30 January 2002, Monterey, CA, pp. 231-244.
- [4] Schwan P. Lustre: Building a file system for 1000-node clusters, Proceedings of the 2003 Linux Symposium. 2003.
- [5] Gluster web site: <http://www.gluster.org/>.
- [6] Fuhrmann P, Gölzow V. dCache, storage system for the future, Euro-Par 2006 Parallel

Processing. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 1106-1113.

[7] Peters A J, Janyst L. Exabyte Scale Storage at CERN, Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2011, 331(5): 052015.

[8] 臧冬松, 霍菁, 梁栋, 等. 基于 MapReduce 的高能物理数据分析系统[J]. 计算机工程, 2014, 40(2): 1-5.

[9] Jones J P. PBS: portable batch system[C]//Beowulf cluster computing with Linux. MIT Press, 2001: 369-390.

[10] Thain D, Tannenbaum T, Livny M. Distributed computing in practice: The Condor experience[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2005, 17(2 - 4): 323-356.

[11] Zhou S. LSF: Load Sharing in Large Heterogeneous Distributed Systems [C]//I Workshop on Cluster Computing. 1992.

[12] Gentzsch W. Sun grid engine: Towards creating a compute power grid [C]//Cluster Computing and the Grid, 2001. Proceedings. First IEEE/ACM International Symposium on. IEEE, 2001: 35-36.

[13] HTCondor web site: <http://research.cs.wisc.edu/htcondor/>.

[14] 程耀东, 刘宝旭, 孙功星, 等. 高能物理与云计算[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 31(11): 1189-1194.

[15] Ulrich Schwickerath, Virtualization at CERN: a status report, HEPiX Spring 2011 Workshop, GSI, Germany.

[16] Da Silva J, Gudmundsson O. The amanda network backup manager [M]. University of Maryland, 1993.

[17] 许冬, 闫晓飞, 程耀东, 等. AFS 在高能物理计算系统中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(3): 440-445.

[18] Leiva R G, López M B, Meli á G C, et al. Quattor: tools and techniques for the configuration, installation and management of large-scale grid computing fabrics[J]. Journal of Grid Computing, 2004, 2(4): 313-322.

[19] Hendrix V, Benjamin D, Yao Y. Scientific Cluster Deployment and Recovery—Using puppet to simplify cluster management[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2012, 396(4): 042027.

[20] Nagios website: www.nagios.org/.

[21] gLite web: <http://glite.web.cern.ch/glite>.

[22] Buncic P, Sanchez C A, Blomer J, et al. CernVM—a virtual software appliance for LHC applications[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2010, 219(4): 042003.

[23] Goasguen S, Moreira B, Roche E, et al. Lxcloud: a prototype for an internal cloud in HEP. Experiences and lessons learned[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2012, 396(3): 032098.

[24] Tusa F, Paone M, Villari M, et al. CLEVER: A cloud-enabled virtual environment[C]//Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on. IEEE, 2010: 477-482.

基金项目：国家自然科学基金项目（编号：11205179）

程耀东：中国科学院高能物理研究所，副研究员，博士，主要研究方向为海量存储、网格计算与云计算。E-mail: chyid@ihep.ac.cn

石京燕：中国科学院高能物理研究所，副研究员，博士，主要研究方向为高性能计算。E-mail:
shijy@ihep.ac.cn

陈刚：中国科学院高能物理研究所，研究员，博士，主要研究方向为高能物理计算。E-mail:
cheng@ihep.ac.cn