

基于 Openstack 的高能物理虚拟计算集群系统及应用

黄秋兰¹ 李海波¹ 石京燕¹ 孙震宇^{1,2} 伍文静¹ 程耀东¹ 程振京^{1,2}

(中国科学院高能物理研究所计算中心 北京 100049)¹ (中国科学院大学 北京 100049)²

摘要 高能物理计算是典型的高性能计算的应用,运行时需要大量的 CPU 资源。如果系统的 CPU 资源利用率不高,会使得计算效率大大下降。传统的高能物理计算环境资源管理是静态的,很难同时满足突发、批处理、CPU 密集型、数据密集型等不同类型的作业对于不同的物理资源的需求。文中基于 Openstack 构建的虚拟计算集群系统,实现以 CPU 核为粒度进行调度作业,根据当前的作业和虚拟资源情况,动态调度资源,大大提高了资源的利用率。首先介绍本系统的相关研究工作,包括 KVM 虚拟机的测试优化、高能物理作业在虚拟机上的性能测试及高能物理公共服务云 IHEPcloud,这些工作进一步表明了高能物理实验的数据分析在虚拟机上的性能是完全可以被接受的;然后详细介绍了虚拟计算集群系统的设计与实现;最后给出虚拟机计算集群在高能物理计算中的实际应用情况,证明了虚拟计算集群系统能很好地满足高能物理的计算需求。

关键词 高性能计算, Openstack, KVM, 虚拟计算集群

中图分类号 TP302 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.10.011

Openstack-based Virtualized Computing Cluster and Application for High Energy Physics

HUANG Qiu-lan¹ LI Hai-bo¹ SHI Jing-yan¹ SUN Zhen-yu^{1,2} WU Wen-jing¹

CHENG Yao-dong¹ CHENG Zhen-jing^{1,2}

(Computing Center, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)¹

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)²

Abstract High energy physics computing is a high-performance computing application, which requires a lot of computing resource. If the utilization of CPU resource is not high, it will cause the worse computing efficiency. In traditional computing environment, the static resource management leads to the difficulty to satisfy the resource requirements of different kinds of jobs such as sudden jobs, batch jobs, CPU-intensive jobs, IO-intensive jobs and so on. The paper discussed the virtualized computing system based on Openstack, which implements scheduling jobs with CPU cores, dynamically schedule the resources, greatly improves the utilization of resources according to the current job and resource status. Firstly, we introduced the relative research activities including KVM performance testing and optimization, performance analysis of HEP (High Energy Physics) jobs running between KVM and physical machines and the public cloud service IHEPcloud. All of them illustrate it's totally acceptable to make HEP jobs run in virtualized platform. Then, we demonstrated the design and implementation of virtualized computing system. Finally, the current status of the virtualized computing cluster is shown, which verifies that the performance of virtualized computing system can meet the needs of high energy physics computing.

Keywords High-performance computing, Openstack, KVM, Virtualized computing cluster

1 引言

随着全球信息化浪潮的快速发展和业务系统处理需要的变化,云计算^[1]作为一种新兴的计算思想和模式,近几年在产业界和学术界引起了广泛的关注。云计算继承了并行计算、分布式计算、网格计算等领域的诸多技术积累,将大规模的计算资源、存储资源与数据和应用融合在一起,以高速的网络为

基础承载架构,通过虚拟化技术提供服务,满足不同类型的用户对于计算、存储等多种资源的需求。虚拟化技术的本质是一种资源管理技术,其使资源不受物理限制而得到合理的利用,实现异构资源的逻辑抽象和统一。云计算以虚拟化技术为重要的支撑技术,通过互联网技术提供资源的共享,在提高资源利用率、灵活的可伸缩性及可管理性方面表现出了巨大的优势。

到稿日期:2016-11-21 返修日期:2017-01-27 本文受国家自然科学基金(11305192, 11605223, 11475210),中国科学院高能物理研究所谢家麟基金(Y6546160U2)资助。

黄秋兰(1982-),女,博士,副研究员,主要研究方向为云计算与海量数据存储, E-mail: huangql@ihep.ac.cn; 李海波(1984-),男,博士,副研究员,主要研究方向为云计算; 石京燕(1972-),女,博士,副研究员,主要研究方向为高性能计算。

高能物理计算是典型的高性能计算的应用,运行时需要大量的CPU计算资源。如果系统的CPU资源利用率不高,会使得计算效率大大下降。因此,如何高效率、高精度地分析海量数据是高能物理计算环境中面临的一个巨大挑战。传统的高能物理计算环境主要通过Torque PBS^[2], HTCondor^[3], LSF^[4]等资源管理和作业调度系统,基于系统负载状态和作业信息将作业调度到物理机器上运行。但是,这种资源管理是静态的,很难同时满足突发、批处理、CPU密集型、数据密集型等不同类型的作业对于不同物理资源(内存、CPU、IO、网络、磁盘空间等)的需求。通常分配给某些作业队列的资源处于空闲的状态,而需要资源的作业却因为得不到资源无法被执行,导致资源难以充分利用。我国新一代高能物理实验的不断展开,对海量数据的高性能计算提出了更高的要求,其中最为重要且关键的就是最大化现有计算集群资源的利用率。因此,十分有必要将高能物理计算环境移植到虚拟化集群上,借助Openstack^[5]和KVM虚拟机^[6]等技术降低应用与基础设施的耦合程度,灵活调度各种类型的作业,实现不同应用需求对资源进行高度共享的目标,从而充分利用资源,提高资源利用率。

本文的重点内容是介绍在高性能物理计算环境下,如何基于Openstack构建虚拟计算集群系统。虚拟计算集群是以CPU核为粒度进行调度作业的,因此大大提高了资源的利用率。文章首先介绍本系统的相关研究工作,包括KVM虚拟机的测试优化、高能物理作业在虚拟机上的性能测试及高能物理公共服务云IHEPCloud,这些工作进一步验证了高能物理实验的数据分析在虚拟机上的性能是完全可以被接受的;然后详细介绍了虚拟计算集群系统的设计与实现,并对系统进行了分析;最后给出虚拟机计算集群在高性能物理计算中的实际应用情况。

2 相关的研究工作

在给出高能物理虚拟计算集群系统之前,先简单介绍虚拟化与高能物理计算相结合的相关研究工作。

2.1 KVM虚拟机的性能测试与优化

在虚拟化的平台中,虚拟机的性能一定程度地影响着实际应用云计算平台上的性能。虚拟机的性能主要由CPU计算能力、磁盘IO和网络IO来进行综合评估。笔者及所在单位主要是在高能物理计算环境下,用各种基准测试工具基于CPU计算能力、磁盘IO和网络IO等参数对KVM虚拟机进行测试,给出虚拟机和物理机的性能差异和定量分析;同时从KVM虚拟机架构上分析影响KVM性能的各种因素,从硬件级、内核级对影响性能的因素展开研究,包括扩展页表EPT(Extended Page Table)、CPU的亲性(CPU affinity)对KVM进行性能优化。优化结果显示,在客户机操作系统的VCPU与物理CPU绑定和关闭扩展页表选项时,KVM虚拟机的CPU性能最好,损失率约为3%,CPU计算能力与优化前相比提高了6%~8%,而磁盘IO性能的提升不大,这与KVM虚拟机的IO虚拟化有关,需要进一步从KVM客户机操作系统源码进行分析与优化。KVM虚拟机的CPU性能

相对比较乐观,尤其在处理CPU密集型的应用方面,在资源共享和资源利用率提高的前提下,3%的损失率可以不予考虑。因此可以得出,优化后的KVM虚拟机比较适合CPU密集型和网络IO密集型的应用^[9]。

2.2 高能物理作业在虚拟机上的性能测试

高能物理计算分为蒙特卡罗模拟计算、重建计算、分析计算3种,主要表现为CPU密集型和网络IO密集型。为了验证高能物理作业在KVM虚拟机上的运行效率,进行了如下测试。

测试环境中物理机的配置为:24个CPU核,16GB内存;虚拟机配置为:1个CPU核,2GB内存。

测试方法:在物理机上运行24个虚拟机,每个虚拟机分配1个CPU,2GB内存,相同数量的高能物理作业运行在物理机和虚拟机上,每个虚拟机运行一个作业。限于篇幅,下面仅给出模拟作业的分析。

表1列出了分别将1个作业、12个作业、24个高能物理的模拟作业运行在相同数量的物理机和虚拟机上的测试结果。表中记录了作业运行的Walltime, CPUtime及CPU效率并通过物理机和虚拟机上作业运行的CPU效率,计算得出虚拟机上作业运行的性能损失率(Penalty)。

表1 模拟作业在物理机与虚拟机上的运行性能比较

Job-pm/vm	Walltime	CPUtime	CPU efficiency/%	Penalty/%
1-pm	3318.51	3303.13	99.5	
1-vm	3427.12	3391.56	98.9	3.3
12-pm	3761.75	3740.76	99.5	
12-vm	3862.58	3828.31	99.1	2.7
24-pm	3786.45	3750.01	99.5	
24-vm	3870.08	3829.19	98.9	2.2

从表1可知,高能物理的模拟作业在虚拟机上的性能损失率在3%左右,当同时运行24个作业时,损失率低至2.2%,结果十分乐观。在资源高度共享和高利用率的前提下,2%~3%左右的性能损失,丝毫不会影响用户体验。

2.3 高能物理公共服务云IHEPCloud

高能物理公共服务云IHEPCloud于2014年11月上线服务,面向中科院高能物理研究所的所有用户及实验合作组人员,给科学计算和各类应用测试提供便携的虚拟计算环境。IHEPCloud利用虚拟化管理软件Openstack实现物理计算资源的虚拟化,通过虚拟化网络 and 虚拟机调度技术,将虚拟化环境与现有的计算环境无缝衔接。目前,IHEPCloud的资源使用分为两部分:一部分提供面向用户的自主服务,实现用户自主申请、自主销毁的管理模式;另一部分用于虚拟计算集群,实现资源的动态调度,最大限度地提高资源利用率。

IHEPCloud平台的计算资源由自动化部署软件puppet^[7]统一部署,使用Openstack实现资源的管理,提供Web界面及可编程接口实现虚拟机的远程控制访问,同时实现高能所邮箱地址的统一认证。为了保证平台的稳定运行,使用了各种监控软件对平台实现实时监控,第一时间发现问题并解决问题。IHEPCloud的资源包括49个物理节点,共1008个CPU核,其中336个CPU核提供面向用户的自主服务,其余节点用于虚拟计算集群,服务于CEPC^[10], BESIII^[11], JU-

NO^[12], LHAASO^[8,13]等物理实验。

3 系统的设计与实现

上述相关的研究工作为虚拟集群系统的设计与实现提供了有力依据。虚拟计算集群系统便是基于 IHEPCloud 设计的。虚拟计算集群系统的实现对用户透明,在用户看来,仍然是传统计算集群的使用方法,用户也不必改变以前的使用习惯。本系统的总体架构如图 1 所示。

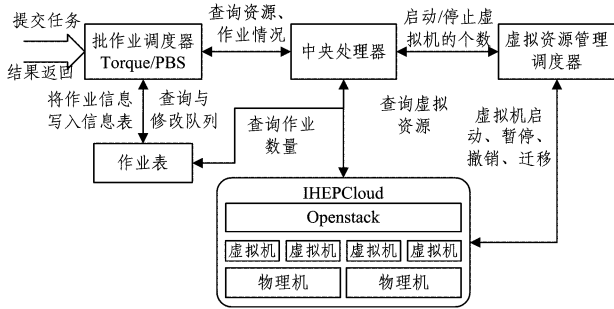


图 1 虚拟计算集群系统的整体架构

本系统主要由 4 个部分组成:中央处理器、虚拟资源管理调度器、作业控制表及运行在虚拟机上的 Jobagent。中央控制器主要负责将作业数量与资源数进行匹配,通过消息传递机制与作业调度器、虚拟资源控制器及作业控制表进行通信,从而获取虚拟资源和作业的数量,使得作业数与资源数匹配,最大化资源利用率。虚拟资源管理器主要负责远程管理 IHEPCloud 中的虚拟机,包括启动、停止虚拟机,同时虚拟资源控制器响应中央控制器对资源的查询请求,提供当前的虚拟资源的使用状况,并接收中央控制器发出的当前作业数量,结合当前的虚拟机数量调整最新的虚拟机数量,以保证作业得以有效运行。作业控制表负责记录和管理用户提交到虚拟计算集群上的作业,更新作业的状态并返回给用户,同时响应中央控制器的查询请求,提供当前作业的运行情况,包括作业的状态、作业总数、正在运行的作业数及等待的作业数。虚拟机上运行的 Jobagent 负责请求与虚拟机匹配的作业,并使作业在该虚拟机上运行,可以称为“拉作业”。

在了解了系统的总体框架及各组件的定义及功能后,下面将详细介绍虚拟资源控制器和 Jobagent 的实现。

3.1 虚拟资源控制器

虚拟资源控制器负责虚拟机资源的远程管理和控制,包括虚拟机的分配、回收,以及根据当前的虚拟机资源需求给出最新的可用资源列表。该组件是系统中实现资源动态调度的关键部分,图 2 给出了资源控制器的结构图。

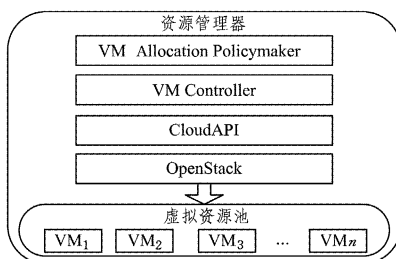


图 2 虚拟资源控制器的结构图

(1) VM Allocation Policymaker:根据中央控制器提供的虚拟机个数、虚拟机的操作系统版本类型及作业结束的虚拟机列表等信息,指定虚拟机的分配和回收决策。虚拟资源控制器的虚拟资源分配策略中规定,虚拟机的生命周期由集群中的作业情况决定,当虚拟机上的作业结束后,如果没有排队的作业,则关闭虚拟机。

(2) VM Controller:根据 VM Allocation Policymaker 给出的决策调用 CloudAPI,远程管理虚拟机,包括虚拟机的创建、启动和关闭等。

(3) CloudAPI:通过调用 Opentack 的 nova-computing 的 API 远程管理虚拟机的接口,包括虚拟机的创建、启动、停止、关闭、获取虚拟机状态机虚拟机个数等。

(4) OpenStack:虚拟资源的管理软件,用于管理虚拟资源池的资源。

3.1.1 消息处理流程

虚拟资源控制器负责根据当前用户提交作业的情况及活跃的虚拟机数,动态调度虚拟机资源。调度决策根据资源控制器与系统中其他组件进行交互的消息来制定。图 3 给出了资源控制器的消息处理流程。

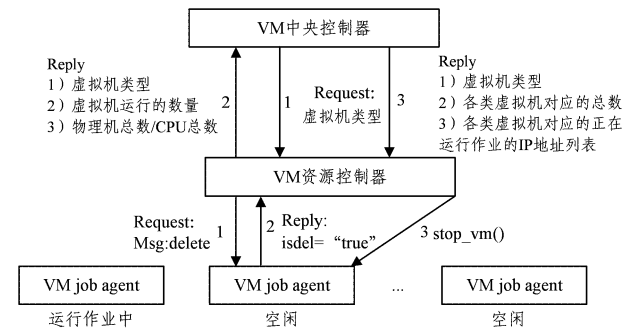


图 3 虚拟资源控制器的消息流

虚拟资源控制器与中央控制器之间的消息处理的具体流程如下:

(1)中央控制器向虚拟资源控制器询问虚拟机的类型、运行的数量及资源池情况;

(2)虚拟资源控制器将虚拟机类型、各种类型的运行数量及物理机总数(CPU 核数)以消息的方式告知中央处理器;

(3)中央控制器将各类虚拟机的需求总数及正在运行作业的虚拟机的 IP 地址列表以消息的形式发送给虚拟资源控制器。

为实现资源的动态调度,虚拟资源控制器还需获得虚拟机的实时信息,用以确定虚拟机上是否有作业运行,同时关闭空闲的虚拟机列表。为区分虚拟机是否空闲,使用标志位“isdel”进行标识,当虚拟机上作业结束且不再有作业运行时, isdel=“true”,虚拟资源控制器收到虚拟机可以删除的消息后,调用 stop_vm()的接口来删除虚拟机。

3.1.2 虚拟机控制接口 CloudAPI

CloudAPI 通过调用 Openstack 提供的 API,实现对虚拟机的远程控制,包括启动虚拟机、关闭虚拟机、创建虚拟机、停止虚拟机、获取虚拟机的 IP 地址、获取虚拟机状态等。具体如表 2 所列。

表2 虚拟机控制接口

方法定义	说明
get_token(self)	获取用户的 tokens, 参数为空, 返回值为 tokens 字符串
list_image(self)	列出所有的镜像信息, 参数为空, 返回值为 image 列表
list_flavor(self)	列出所有的 flavor 信息, 参数为空, 返回值为 flavor 列表
get_active_vm_num(self)	获取处于活跃状态的虚拟机数量, 参数为虚拟机的 ID, 返回值为数量
create_flavor(self, cpu, memory, disk)	创建新的 flavor, 参数为 cpu 数、内存大小、磁盘大小, 返回值为 flavor 标识
list_network_instance(self, serverid)	列出当前虚拟机的网络信息
get_instance_from_ip(self, ip)	通过 IPv4 地址获取虚拟机的 instance id, 返回值为 instance id
create_vm(self, sname, imageid, flavorid)	创建一个虚拟机, 参数为虚拟机名称、所用 image ID、所用 flavor ID, 返回值为空
start_vm(self, serverid)	启动一个虚拟机, 参数为虚拟机的 ID, 返回值为空
stop_vm(self, serverid)	停止一个虚拟机, 参数为虚拟机的 ID, 返回值为空
delete_vm(self, serverid)	删除一个虚拟机, 参数为虚拟机的 ID, 返回值为空
get_vmstat(self, serverid)	获取特定虚拟机的状态, 参数为虚拟机的 ID, 返回值为虚拟机状态

3.2 虚拟机上的 Jobagent

Jobagent 运行在虚拟机上, 此进程实现“拉作业”的功能。Jobagent 进程的生命周期与虚拟机的生命周期一致, 在虚拟机启动时作为 linux 的服务进程启动, 随着虚拟机的关闭停止服务。

高能物理实验的多样性决定了高能物理作业的多样性, 每种作业均有自己特殊的运行环境, 表现在操作系统、依赖库的差异上。为了很好地支持各种高能物理实验, 虚拟机的镜像有多种。系统事先根据作业类型定义镜像的各种参数, 如操作系统、CPU 核数和内存大小等硬件参数。Jobagent 的设计目标就是保证每个虚拟机能正确运行与自身环境匹配的作业。这样, 虚拟机启动时, Jobagent 会根据虚拟机的运行环境拉取与虚拟机环境匹配的作业, 并使作业运行。作业运行的过程中, Jobagent 还对作业有监控的功能; 作业结束时, 通知作业控制表更新作业结束的状态, 并同时 will 作业运行的时间、内存使用等信息更新到作业控制表中。图 4 为 Jobagent 的流程图。

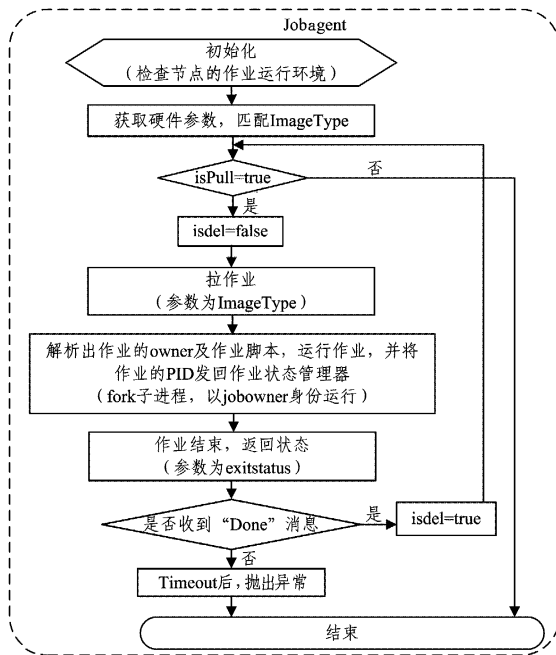


图4 Jobagent的工作流程图

Jobagent 在启动时, 首先检查虚拟机节点的运行环境, 若运行环境一切正常, 则获取虚拟机的硬件参数, 并根据参数的配置信息得到虚拟机所对应的虚拟机类型; 接着, 根据虚拟机的类型向作业控制表拉取表中匹配且处于排队状态的作业,

作业成功拉到虚拟机上后, 进行作业运行环境的初始化操作, 包括作业用户身份切换、shell 转换、环境变量设置等; 然后, 作业开始在虚拟机上以作业属主的身份运行; 最后, 作业结束后, 将作业的退出状态及资源使用情况以消息的方式更新到作业控制表中, 同时 Jobagent 做好拉取下一个作业的准备。

需要指出的是, Jobagent 设计的关键点在于作业的拉取与虚拟机的删除控制, 主要通过两个标识量来进行控制: isPull 和 isdel。isPull 的初始值为“true”, 表示 Jobagent 启动时默认可以拉作业。isdel 的初始值为“false”, 表示虚拟机启动时默认不能删除。当作业执行结束且作业控制表中再也拉不到作业时, 将 isdel 设置为“true”, 表示虚拟机处于可删除状态, 同时将 isPull 设置为“false”, 这时虚拟机可以关闭。

3.3 系统分析

本系统实现的虚拟计算集群将传统的批作业管理系统 Torque PBS 与 Openstack 进行集成, 实现了基于 CPU 核为粒度的调度, 同时, 虚拟资源的动态调度大幅提高了计算资源的利用率。举例来说, 计算集群上有 BESIII 队列和大亚湾队列, 它们分别处理 BESIII 实验的作业和大亚湾反应堆中微子实验^[14]的作业。假设集群中有 4 台机器 (计算节点), 每个机器上有 8 个 CPU 核, 则最多同时运行 8 个作业。其中每个队列各一个专用节点, 其余两个为共享资源, 在传统的计算环中, BESIII 和大亚湾反应堆中微子实验最多可利用 3 个节点的计算资源, 最多可提交 24 个作业, 如图 5(a) 所示。

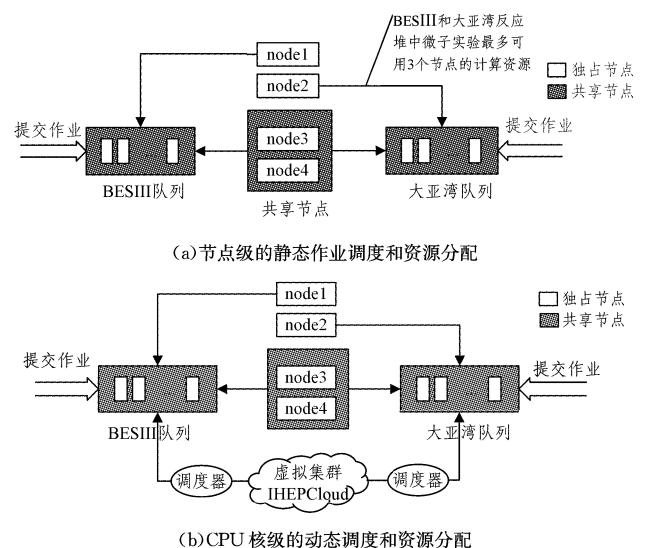


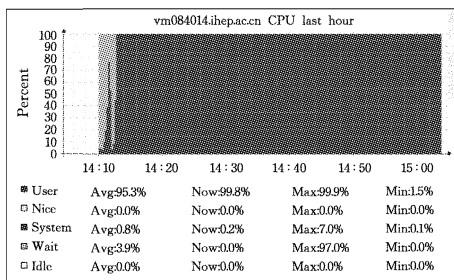
图5

计算资源的分配和调度以节点为单位,利用率很低。例如假设集群中有 16 个 BESIII 作业和 9 个大亚湾中微子作业,此时 BESIII 有紧急的数据处理时又提交了 7 个作业,虽然节点 node4 上还有资源,但是这些资源得不到利用。本系统实现的虚拟计算集群扩展了可用计算资源的范围,资源分配和调度以 CPU 核为单位。虚拟资源调度器根据中央控制器和当前虚拟机的运行数量,可以得出 node4 中可用的 CPU 核数为 7,这样能在共享节点上同时调度 BESIII 和大亚湾反应堆中微子的作业并正常独立运行,如图 5(b)所示。

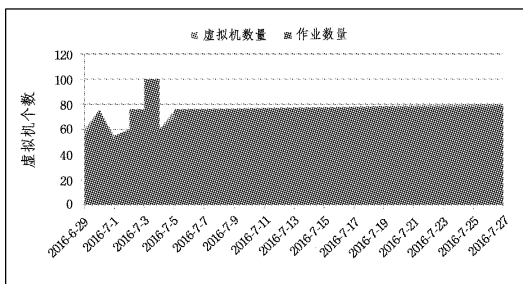
4 系统在高能物理中的应用

虚拟计算集群系统基于虚拟机技术,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,支持各种高能物理实验;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,笔者所在单位的虚拟集群系统的规模为 672 个 CPU 核,已应用于 CEPC, BESIII, JUNO, LHAASO 实验,大大提高了系统资源的利用率和作业的运行效率;同时对外仍然是传统的作业提交方式,用户感觉不到虚拟集群系统与原有系统的不同。从实际的运行效果可知,作业的运行效率与在物理集群上相当,资源的动态调度使得资源利用率得到了很大提高。

图 6(a)给出了 CEPC 作业在虚拟机上运行的 CPU 利用率为 99.98%,这个结果验证了作业在虚拟机和物理机上运行的效果一致。图 6(b)给出了虚拟计算集群系统中 CEPC 实验资源的动态调度效果图。本系统中,虚拟机的启动、停止由用户的作业数和当前运行的虚拟机数量决定,基本上保证了运行的虚拟机数量与作业数量相等。图 6(b)说明了本系统根据当前虚拟机数量和作业数量动态调度资源的有效性,这保证了各实验组之间资源的充分共享。在虚拟计算集群中,资源利用率高达 95%,比传统的计算集群平均 50%左右的利用率提高了快一倍,大大提高了高能物理计算环境中的资源使用率。



(a)CEPC 作业的 CPU 运行效率



(b)CEPC 实验资源的动态调度效果图

图 6

结束语 本文采用虚拟化技术,结合高能物理计算的特点,基于 Openstack 设计了一套高能物理虚拟计算集群系统,研究并开发了虚拟资源控制器与虚拟机上运行的 Jobagent,实现了虚拟资源的动态调度,同时系统对用户透明。文中还结合高能物理的实际应用对系统进行了分析,给出了实际高能物理作业在本系统上的运行效果。从系统分析及实际运行中可以得出结论:虚拟计算集群系统在保证高能物理计算作业正确无误的前提下,计算环境的资源利用率表现出很大的优势,作业的运行效率也与在物理机上相当,验证了系统能够很好地满足高能物理计算的需求。目前系统的规模不是很大,下一步将有更多的实验组的资源加入系统中,在大规模的使用中不断改进和完善,如资源抢占、动态调度算法的优化、记账系统、支持更多的批作业调度系统等。

参 考 文 献

- [1] FOSTER I, et al. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared[C]// Grid Computing Environments Workshop (GCE'08). Austin, 2008.
- [2] STAPLES G, TORQUE resource manager[C]// ACM/IEEE Conference on Supercomputing. ACM, 2006; 8.
- [3] HTCondor [EB/OL]. <https://research.cs.wisc.edu/htcondor>.
- [4] ETSION Y, TSAFRIR D. A Short Survey of Commercial Cluster Batch Schedulers[R]. Hebrew Univ of Jerusalem, 2005.
- [5] Openstack [EB/OL]. <https://www.openstack.org>.
- [6] KIVITY A, KAMAY Y, LAOR D, et al. kvm: the Linux Virtual Machine Monitor [C] // Linux Symposium, Ottawa, Ontario, 2014.
- [7] OHMAN H, PANITKIN S, HENDRIX V. Using Puppet to Contextualize Computing Resources for Atlas Analysis on Google Compute Engine [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 513: 032073.
- [8] CHEN M J, YAO Z G, GAO B, et al. R&D of LHAASO-WCDA [C]// 32nd International Cosmic Ray Conference. Beijing, China, 2011.
- [9] HUANG Q L, LI S, CHENG Y D, et al. Performance optimization and Application of KVM in HEP computing Environment [J]. Computer Science, 2015, 42(1): 67-71. (in Chinese)

黄秋兰,李莎,程耀东,等.高能物理计算中的KVM虚拟机性能优化与应用[J].计算机科学,2015,42(1):67-71.

- [10] CEPE [EB/OL]. <http://cepc.ihep.ac.cn>.
- [11] LIU L, ZHU Z, HAN S, et al. The cryogenic system of BESIII in preliminary design[C]// Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20). 2005; 39-42.
- [12] Jiangmen Underground Neutrino Observatory [EB/OL]. <http://english.ihep.cas.cn/rs/fs/juno0815>.
- [13] LHAASO [EB/OL]. <http://english.ihep.cas.cn/ic/ip/LHAASO>.
- [14] HAO H F. Development of VME-based RPC Electronics for Daya Bay Reactor Neutrino Experiment [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)

郝慧峰.大亚湾反应堆中微子试验中基于VME的RPC电子学研制[D].合肥:中国科技大学,2012.