

# 构建云计算平台的开源软件综述

林利 石文昌

(中国人民大学信息学院 北京 100872)

(中国人民大学数据工程与知识工程教育部重点实验室 北京 100872)

**摘要** 云计算开源软件的涌现为云计算平台的构建提供了便利,同时也为人们从中选择合适的软件带来了挑战。为明确如何构建云计算平台,研究现有用于构建云计算平台的开源软件十分必要。考察构建云计算平台的开源软件的发展状况,从提供服务的角度对各种服务模型的开源软件体系结构进行剖析,通过对比分析当前典型的用于构建云计算平台的开源软件,来为云计算平台建设者利用此类软件构建符合特定需求的云计算环境提供有效的途径。

**关键词** 云计算, 开源软件, IaaS, PaaS, SaaS

**中图分类号** TP309 **文献标识码** A

## Survey of Open Source Software for Building Cloud Computing Platforms

LIN Li SHI Wen-chang

(School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

(Key Lab of Data Engineering and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

**Abstract** The emergence of open source software for cloud computing facilitates the building of cloud computing platforms, but meanwhile it challenges the choosing of appropriate ones from these pool of software. To figure out how to build a cloud computing platform, research on existing open source software for building cloud computing platforms is necessary. This paper investigated the development of these kinds of open source software and analyzed their architectures from the perspective of service models. Through comparison and analysis of representatives of them, effective ways were proposed for developers to choose appropriate pieces of software to build a specific cloud computing platform.

**Keywords** Cloud computing, Open source software, IaaS, PaaS, SaaS

开源软件的发展已经有相当长的历史,它们受到业界的广泛欢迎<sup>[1]</sup>。对云计算平台建设者而言,开源软件是构建云计算平台很重要的资源。近年来,随着云计算的迅猛发展,大量用于构建云计算平台的开源软件相继出现。每款软件都具有各自的特色,可以解决不同的问题,但是每款软件在解决问题时又都具有一定的局限性,这使得云计算平台建设者在利用开源软件构建云计算平台时,很难从众多的开源软件中做出合理的抉择<sup>[2,3]</sup>。如何利用现有的云计算平台开源软件构建符合特定需要的云计算平台,是建设者面临的一个问题。

充分了解各款云计算平台开源软件的特征,对其进行对比分析,有助于解决这一问题。目前,不少学者对云计算平台开源软件进行了一定的研究。文献[3]从软件架构和映像管理等角度对 ECP<sup>[4]</sup>、Eucalyptus<sup>[5]</sup>、OpenNebula<sup>[6]</sup>和 oVirt<sup>[7]</sup> 4款提供云基础设施服务的开源软件进行了分析比较。文献[8]从功能架构和应用场景等方面对 Eucalyptus、Nimbus<sup>[9]</sup>和 OpenNebula 进行了对比分析,同时指出每款软件在应用中面临的挑战并给出改进建议。文献[10]从功能架构和基本特征

的角度对提供基础设施服务的4款开源软件 AbiCloud<sup>[11]</sup>、Eucalyptus、Nimbus 和 OpenNebula 进行了对比分析。除此之外,其他一些研究团队也从功能架构的角度对构建云计算平台的开源软件做了相关对比分析<sup>[12-16]</sup>。以上工作主要是对若干典型的开源软件进行对比分析,分析了它们的不同点,但并未从云计算平台建设者如何选择软件的角度进行探讨。为了能更加全面地了解各种服务模型的开源软件,弄清如何利用现有的开源软件来构建云计算环境,本文从软件选择的角度对构建云计算平台的开源软件进行研究,选择了提供基础设施服务的开源软件 Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack<sup>[17]</sup>,提供平台服务的开源软件 Hadoop<sup>[18]</sup>、CloudFoundry<sup>[19]</sup>和 OpenShift<sup>[20]</sup>,以及提供软件服务的开源软件 Zimbra<sup>[21]</sup>、OpenId<sup>[22]</sup>、TeamLab<sup>[23]</sup>和 Funambol<sup>[24]</sup>作为研究对象。通过对它们的对比分析,希望能为如何选择开源软件构建云计算平台探索出有效的途径。

针对如何选择开源软件构建云计算平台的问题,本文首先考察构建云计算平台的开源软件的发展状况,接着讨论 3

到稿日期:2012-01-05 返修日期:2012-03-20 本文受国家自然科学基金项目(61070192,61170240),北京市自然科学基金项目(4122041)资助。

林利(1986-),女,硕士生,主要研究方向为信息安全;石文昌(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为信息安全、可信计算、系统软件与数字取证,E-mail:wenchang@ruc.edu.cn(通信作者)。

种不同服务模型的云计算平台开源软件的体系结构,然后对不同服务模型的云计算平台开源软件进行对比分析,最后为如何选择开源软件构建云计算平台提出一种建议方案。

## 1 云计算平台开源软件的发展状况

随着云计算的迅猛发展,IT 业界和相关领域给予了云计算越来越广泛的关注<sup>[25-29]</sup>。在此刺激之下,各种用于构建云计算平台的开源软件纷纷涌现。加利福尼亚大学的研究小组通过计算集群或者工作站群实现弹性和实时的云计算,开发了 Eucalyptus,该软件目前已经商业化,但是它仍然按照开源项目的方式去维护和开发。欧洲研究学会在发起的虚拟基础设施和云端计划的基础之上开发了 OpenNebula,用于在实体资源上动态部署虚拟机(VM)。加拿大的开源软件公司 Enomaly 把企业数据中心与商业云计算服务集成起来,开发了 ECP。另外, Globus、Redhat、Apache 和 VMware 等公司也纷纷推出了 Nimbus、OpenShift、Hadoop 和 Zimbra 等一系列云计算平台软件。

以上这些云计算平台开源软件的出现,大大地促进了许多企业和研究机构采用这些软件来部署云环境。克莱姆森大学和欧洲原子能研究中心(CERN)利用 400 台物理机部署 7500 台 VM 在 OpenNebula 的云平台上,用于运行批处理作业<sup>[30]</sup>。DGRZR(DGrid Resource Center Ruhr)利用 247 个刀片服务器建立起了 1972 个 VM,使得整个 Dgrid 的软件栈都运行在虚拟机上<sup>[31]</sup>。美国 Argonne 国家实验室利用 Eucalyptus 部署了 200 多个节点的云计算研究环境,在上面运行大约 800 个 VM 来研究云环境中的安全问题<sup>[32]</sup>。美国芝加哥大学利用 Nimbus 建立了 16 个节点的研究环境(其中每个节点有两个 2.2GHz AMD64 位处理器、4GB 内存和 80GB 硬盘),分配了 16 个公共 IP 用于 VM 的租赁,并提供 100GB 的存储空间<sup>[33]</sup>。中国银行利用 ECP 部署内部私有云环境<sup>[34]</sup>。Google Apps 利用开源软件 OpenId 来实现对其庞大建设者的身份认证管理<sup>[35]</sup>。现有利用开源云计算项目 Hadoop 部署云计算环境来解决企业内部海量数据处理和存储问题的企业和研究机构更是不胜枚举,如 Adobe、Facebook、Twitter 和百度等<sup>[36]</sup>。云计算平台开源软件的广泛使用也对云计算相关技术和软件提出了更高的要求,进一步推动了云计算的应用和发展。

## 2 云计算平台开源软件结构分析

云平台的建设者必须要弄清平台应该提供的服务类型,才能建立起对应的云计算平台。根据美国国家标准与技术研究所(NIST)的定义<sup>[37]</sup>,云计算提供的服务从下往上分为 3 个层次,分别是基础设施服务(IaaS)、平台服务(PaaS)和软件服务(SaaS)。图 1 描述了这 3 种服务模型的层次关系。在 IaaS 服务模型中,云计算平台给用户处理、存储、网络连接和其他计算资源,用户能够在云上部署和运行任意的软件(包括操作系统和应用),无需管理和控制底层的基础设施,但可以控制操作系统、存储、网络连接和部署的组件<sup>[37,38]</sup>。在 PaaS 服务模型中,云计算平台给用户提提供开发、部署和测试应用的环境,用户无需了解底层硬件资源的情况就可以在这

个环境中部署应用程序,配置应用的托管环境<sup>[37,39]</sup>。在 SaaS 服务模型中,云计算平台给用户提提供应用,用户可以通过瘦客户端(如浏览器)使用应用,而无需关心底层基础设施环境的情况<sup>[37]</sup>。从用户角度看,这 3 种服务模型是相互独立的,面向不同类型的用户提供服务。从技术角度看,这 3 种服务模型间又存在一定的联系,因为 SaaS 可以是基于 PaaS 部署或者直接部署于 IaaS 之上,PaaS 可以构建于 IaaS 之上,也可以直接构建在物理资源之上。下面结合具体的云计算平台开源软件,从体系结构的角度对 3 种服务模型的开源软件进行剖析。

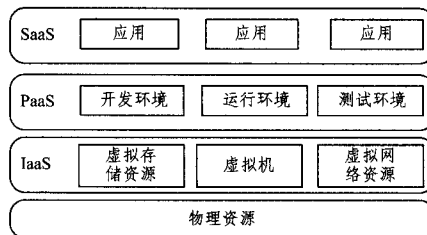


图 1 云服务模型层次关系

### 2.1 IaaS 软件体系结构

IaaS 软件位于云计算服务的最底层,此类软件向用户提供 VM、虚拟存储和虚拟网络等基础设施资源。现有开源软件支持的 IaaS 体系结构大体上可分为两种,一种是以 OpenNebula、Nimbus 和 ECP 等开源软件为代表的两层体系结构,如图 2 所示;另外一种是以 Eucalyptus 和 XEN Cloud<sup>[40]</sup>等开源软件为代表的三层体系结构,如图 3 所示。

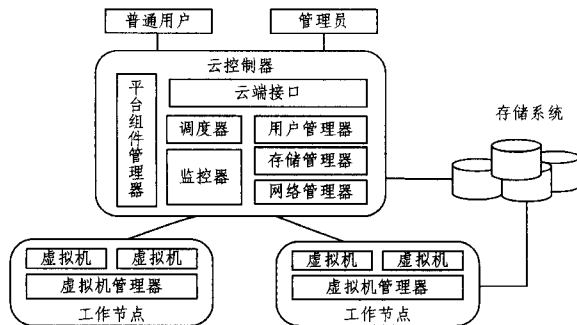


图 2 IaaS 的两层体系结构

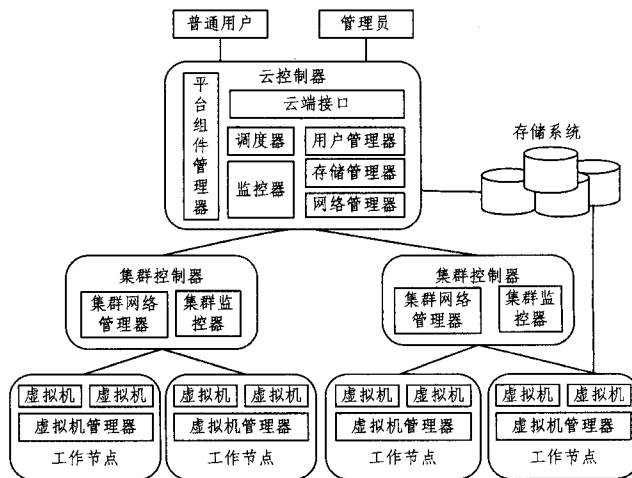


图 3 IaaS 的三层体系结构

两层体系结构分为控制层和工作节点层,其中控制层由云控制器和存储系统构成,工作节点层由一系列的工作节点构成。云控制器是客户端与云计算平台通信的接口,对整个平台的工作节点实施调度管理,其组件大致包括云端接口、平台组件管理器、调度器、监控器、用户管理器、存储管理器和网络管理器。存储系统用于存储平台中所用到的映像文件。客户端(用户和云计算平台管理员)可以通过命令行和浏览器接口访问云计算平台。云端接口将来自客户端的命令转换成整个平台统一识别的模式。平台组件管理器管理整个平台的组件。监控器负责监控各个工作节点上资源的使用情况,为调度器调度工作节点和平台实施负载均衡提供参考。用户管理器对用户身份进行认证和管理。存储管理器与具体的存储系统相连,用于管理整个平台的映像、快照和虚拟磁盘映像文件等<sup>[41]</sup>。网络管理器负责整个云计算平台里的虚拟网络的管理,包括 VLAN<sup>[42]</sup>和 VPN<sup>[43]</sup>等。工作节点上运行虚拟机管理器(VMM,如 VMWare<sup>[44]</sup>、XEN<sup>[45]</sup>和 KVM<sup>[46]</sup>等),用户可以在这些 VMM 上部署 VM 实例,并在 VM 上建立软件环境和应用。同时平台可以通过 VMM 来管理 VM 实例,如 VM 的挂起和迁移等。通过使用 VM,用户便可以享受到云计算平台所提供的基础设施服务。

单从体系结构图来看,三层体系结构与两层体系结构的主要区别是增加了一个集群控制节点中间层,该层的作用主要有 3 个方面:

(1)控制相应集群中的网络管理情况,一般会在集群节点上建立起该集群的 DHCP 和 DNS 服务器。

(2)监控该集群中节点的资源使用情况并将监控到的结果向上层的云控制器汇报,云控制器对底层的工作节点的调用要以集群控制节点监控到的信息为参考。

(3)充当路由器的功能,当两个集群间的工作节点通信时,它们通过双方的集群控制节点进行通信。

从功能角度来看,相对于两层体系结构而言,三层体系结构具有更好的扩展性。在两层体系结构中,云控制器直接管理工作节点,这种直接管理方式使得云控制器对 VM 的部署速度更快。在三层体系结构中,由集群控制节点与工作节点直接通信,工作节点通过集群控制节点与云控制器进行通信,云控制器通过中间层集群控制节点来负责对工作节点的调度,这样缓解了云控制器的开销,增强了整个平台的扩展性。

## 2.2 PaaS 软件体系结构

PaaS 软件位于平台服务层,此类软件向用户提供开发、运行和测试应用的环境。图 4 展示了以 Hadoop 和 Cloud-Foundry 为代表的 PaaS 开源软件的体系结构,该体系结构包括云控制器和节点两部分。云控制器包含的组件有云端接口、平台组件管理器、调度器、监控器、应用执行引擎、用户管理器和数据库管理器。客户端可以通过命令行和浏览器接口使用 PaaS 平台提供的开发、部署和测试的应用环境。云端接口是用户访问云计算平台的接口,一般特指编程的 API 接口和用户远程使用平台的接口。平台组件管理器、监控器、调度器和用户管理器发挥着与 IaaS 中相应组件相同的功能。应用执行引擎负责启动各个节点上的任务。在各个节点上,为保护应用进程实施了应用间的隔离,比如使用 JVM 虚拟机<sup>[47]</sup>进行隔离。

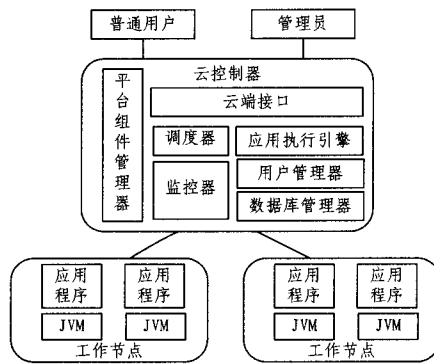


图 4 PaaS 的体系结构图

## 2.3 SaaS 软件体系结构

SaaS 软件把应用作为服务提供给用户,它可以部署在 IaaS 和 PaaS 之上。图 5 展示了以 Zimbra 和 OpenId 等为代表的 SaaS 平台软件的体系结构,其包含云控制器、应用节点和存储系统 3 部分。云控制器中的组件主要有:云端接口、平台组件管理器、元数据管理器、应用管理器、用户管理器、监控器和数据库管理器。用户通过浏览器对整个平台进行访问。元数据管理器对整个平台应用的元数据进行管理。应用管理器管理应用软件的运行状况,如访问平台的进程调度和平台负载均衡。数据库管理器直接控制存储系统,实现对平台中应用数据的管理。SaaS 平台中的平台组件管理器、监控器和用户管理器与 IaaS 和 PaaS 中相关组件的功能类似。应用节点上运行着云控制器所分配的具体应用。通常情况下,一个 SaaS 平台不止给用户提供一种应用(如 Zimbra 不仅向用户提供邮件管理,还提供聊天服务)。这些应用可能运行在一个物理机上,也可能运行在多个物理机上。用户使用平台提供的应用,而不用关心应用程序的具体运行情况。

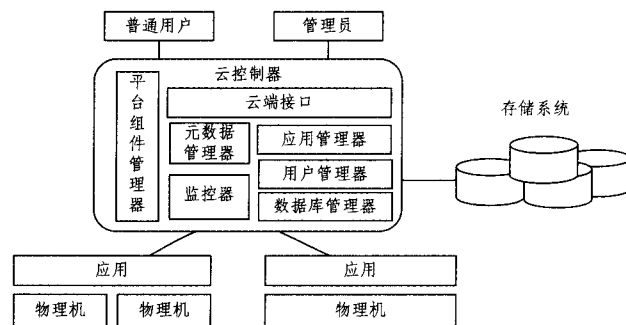


图 5 SaaS 的体系结构图

## 3 云计算平台开源软件的对比分析

比较典型的 IaaS 类开源软件有 Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack, PaaS 类开源软件有 OpenShift、CloudFoundry 和 Hadoop, SaaS 类开源软件有 OpenId、Zimbra、TeamLab 和 Funambol。根据第 2 节对各种服务模型开源软件体系结构的描述情况,下面从平台使用角度对以上开源软件进行对比分析。

### 3.1 IaaS 开源软件对比分析

从市场使用的份额看, Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack 是几款使用非常广泛的提供 IaaS 服务的云计算平台软件。表 1 对它们的功能和基本特征进行了分析

对比。下面从 VM 创建、VM 使用、监控、集群管理和网络管理的角度对它们进行详细的对比分析。

表 1 主流 IaaS 云计算平台软件的特征对比

云平台	体系结构	资源调度	VM 分派策略	支持的 VMM	存储系统	迁移	支持的接口	所支持的映像格式
Eucalyptus	三层	贪婪算法, 轮询算法, 绿色算法 (Green-it) <sup>[50,51]</sup>	尽快租用 <sup>[50,51]</sup>	VMWARE, XEN, KVM <sup>[50,51]</sup>	Walrus <sup>[50,51]</sup>	不支持	Web 接口, EC2	RAW, Qcow2, VM-DK, OVF <sup>[50,51]</sup>
OpenNebula	两层	排序调度策略 (Rank Scheduling Policy) <sup>[52]</sup>	排队系统, 资源预留, 尽快租用, 立即租用 <sup>[52]</sup>	VMWARE, XEN, KVM	NFS, SAN, NAS	实时迁移, 冷迁移	Web 接口, EC2, OCC <sup>[52]</sup>	Raw, Qcow2, VM-DK, OVF <sup>[52]</sup>
Nimbus	两层	排序调度策略 (Rank Scheduling Policy) <sup>[53,54]</sup>	快速租用, 尽快租用 <sup>[53,54]</sup>	XEN, KVM <sup>[53,54]</sup>	Cumulus <sup>[53,54]</sup>	实时迁移, 冷迁移 <sup>[53,54]</sup>	Web 接口, EC2, WSRP <sup>[53,54]</sup>	Raw, Qcow2 <sup>[53,54]</sup>
ECP	两层	排序调度策略 (Rank Scheduling Policy) <sup>[55]</sup>	尽快租用 <sup>[55]</sup>	VMWARE, XEN, KVM	NFS <sup>[55]</sup>	冷迁移 <sup>[55]</sup>	Web 接口 <sup>[55]</sup>	Raw, Qcow2, VM-DK, OVF <sup>[18]</sup>
OpenStack	两层	轮询算法, 最小繁忙算法 (Least Busy) <sup>[56-58]</sup>	尽快租用 <sup>[56-58]</sup>	XEN, KVM, VMWARE-ESX, LXC, QEMU, UML <sup>[56-58]</sup>	LVM, Sheepdog, SAN <sup>[56-58]</sup>	实时迁移, 冷迁移 <sup>[56-58]</sup>	Web 界面, EC2 <sup>[56-58]</sup>	Raw, VHD, VDI, VMDK, OVF, Qcow2 <sup>[56-58]</sup>

### (1) VM 的创建

安全和效率是创建 VM 时须考虑的最重要的因素。在创建 VM 时, Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack 这 5 款开源软件的云控制器均通过从存储系统将映像(这些映像指已经预装所需的应用软件的操作系统)拷贝到工作节点来创建 VM, 不同的是, OpenNebula 和 ECP 允许平台使用者在拷贝映像时指定工作节点, 其他几款不允许。Eucalyptus 为保证映像存储的安全性, 将映像文件分为客户操作系统内核、根文件系统映像和可选的 RAM 硬盘映像 3 部分来存储, 因此在创建 VM 时, 需要消耗一些时间来整合映像文件, 但是平台使用者基本感觉不到影响。另外, Eucalyptus 在创建虚拟机前要求平台使用者先创建密钥对, 该密钥对将在 VM 创建时配置进虚拟机, 以便平台使用者能够 ssh 登录 VM。Nimbus 的存储系统 Cumulus<sup>[48]</sup> 本身就是一个云存储系统, 具有高吞吐率。在实际应用中, 由于映像文件通常比较大, 存储系统的高吞吐率能够节省拷贝时间。OpenStack 在创建 VM 时, 需要用户指定登录虚拟机的密码, 以此来保证仅虚拟机的创建者能使用虚拟机。综上所述, 在这几款 IaaS 软件中, Eucalyptus 的安全性是最好的, 而 Nimbus 是最快的。

### (2) VM 的使用

在利用 Eucalyptus 构建的云计算平台中, 采用 VNC<sup>[49]</sup> 技术来允许使用者以图形界面的方式使用 VM。值得注意的是, 如果使用者在平台中使用了“安全组 (Security Group)”功能, 则需将 VM 中与 VNC 对应的相关端口打开。OpenNebula 最初仅让平台使用者通过命令行的方式使用虚拟机, 但是在它 3.0 后的版本中引入了 VNC 技术来支持使用者通过图形界面的方式使用 VM, 但这种方式会导致云控制器在工作节点监控到的信息不准确。Nimbus 目前尚不支持用户通过图形界面的方式来操作 VM。ECP 和 OpenStack 开发之初便采用了 VNC 技术, 让平台使用者直接通过图形界面的方式使用 VM。

### (3) 监控

监控是整个云计算平台必不可少的功能。Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack 这 5 款开源软件均能监控 VM 的基本状态信息, 如挂起、运行和关闭。OpenNebula 除了监控到 VM 的基本信息以外, 还能监控到更加详

细的 VM 状态信息, 如 VM 使用映像的情况和网络连接情况等。同时 OpenNebula 也能提供工作节点的监控图表, 其有助于平台管理员根据图表情况管理整个平台。为了保证单个工作节点不会因负载过大而崩溃, OpenNebula 和 OpenStack 均引入了 Quota 系统来限制开销<sup>[52,59]</sup>。Quota 系统通过监控各个工作节点上的物理资源使用情况来限制新创建的 VM 部署到该工作节点上。在 OpenNebula 和 OpenStack 中, Quota 系统赋予管理员的权限却不相同, OpenNebula 中, 管理员可以随时配置 Quota 系统参数, 而 OpenStack 中, 管理员却不能对 Quota 系统进行配置。

### (4) 集群管理

Eucalyptus 采用三层体系结构, 由中间层的集群控制器节点来管理下层工作节点, 一个集群控制器管理一个集群。OpenNebula、Nimbus 和 OpenStack 均采用两层体系结构, 目前它们的最新版本引入了集群技术, 通过云控制器来实现集群的管理, 相对于 Eucalyptus, 它们管理的工作节点比较有限。ECP 也采用两层体系结构, 与 OpenNebula、Nimbus 和 OpenStack 使用集群技术实现集群管理不同, 它是通过在各工作节点安装 ECP 软件包来实现集群管理的。

### (5) 网络管理

Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack 这 5 款开源软件向 VM 提供 IP 地址的方式不同。Eucalyptus 和 Nimbus 均在每一个工作节点安装了虚拟网络的 DHCP 服务器, VM 的 IP 地址和 MAC 地址均由这个 DHCP 服务器分配。同时, Eucalyptus 的网络管理器提供多种网络管理方式, 其中最具特色的是管理模式 (Managed Mode), 在这种模式下, 平台使用者可以定义“命名网络 (Named Networks)”和“安全组 (Security Group)”来保证虚拟网络通信的隔离, 在创建 VM 的模板文件中选择是否允许 ping 或者远程登录虚拟机。OpenNebula 的网络管理器允许用户事先在模板文件中配置虚拟网络的相关参数(包括 IP 地址、MAC 地址和 VLAN 的网关等), 通过该模板文件来创建虚拟网络资源池, 虚拟机启动时可以直接从虚拟网络资源池中动态获取 IP 地址。ECP 的网络管理器仅为 VM 提供静态的 IP 地址, 并且这个 IP 地址需要用户事先在模板文件中配置, 而不能通过网络资源池的方式动态获取 IP。OpenStack 的网络管理器为 VM 提

供浮动 IP,同时它是这几款 IaaS 软件中唯一为 VM 提供 IPV6 地址的软件。

### 3.2 PaaS 开源软件对比分析

PaaS 服务模型的云计算平台为用户提供开发、运行和测试应用的环境,对 PaaS 开源软件的对比分析将从它们所提供的语言、编程框架、数据存储和对 IaaS 平台的适应能力 4 方面进行。下面针对 Hadoop、CloudFoundry 和 OpenShift 这 3 款典型的 PaaS 开源软件进行对比分析。

#### (1) 编程语言

利用 Hadoop 软件构建的云计算平台支持 C++ 和 Java 编程语言的开发。利用 CloudFoundry 软件构建的云计算平台支持 Java 和 Ruby 编程语言的开发。利用 OpenShift 软件构建的云计算平台支持 Ruby、Python、Perl、PHP 和 Java 编程语言的开发。

#### (2) 编程框架

利用 Hadoop 软件构建的云计算平台支持大规模集群上的分布式并行编程框架 MapReduce。利用 CloudFoundry 软件构建的云计算平台支持 Java 的 Spring 编程框架、Ruby 语言编写的开源 Web 应用框架 Rails 和 Groovy 语言编写的快速 Web 应用开发框架 Grails。利用 OpenShift 软件构建的云计算平台支持 Java EE 框架、Rails 框架和用 PHP 编程语言开发的 Web 框架 SYmfony 等多种框架。

#### (3) 数据存储

利用 Hadoop 软件构建的云计算平台提供存储海量数据的分布式文件系统 HDFS,该文件系统具有对数据读写的高吞吐率,有良好的兼容性。利用 CloudFoundry 软件构建的云计算平台支持关系型数据库 Mysql,同时也支持非关系型数据库 MongoDB 和 Redis。利用 OpenShift 构建的云计算平台支持关系型数据库 Mysql 和 SQLite,以及非关系型数据库 MongoDB、Membase 和 Memcache。

#### (4) 对 IaaS 平台的适应能力

PaaS 平台可以直接部署在 IaaS 平台之上,而 IaaS 层面的工作节点可以动态伸缩,但每一次伸缩都会带来 PaaS 平台的又一次调整。OpenShift 使用了 RedHat's 的 Deltacloud API(一套统一的 IaaS 管理接口),因此,用 OpenShift 部署的云计算平台是唯一能随着 IaaS 工作节点的变化而动态伸缩的 PaaS 平台<sup>[60]</sup>。

### 3.3 SaaS 开源软件对比分析

对建设者而言,使用 SaaS 类的平台软件主要关心这些软件所提供的具体应用。因此针对 SaaS 开源软件的对比分析主要从应用的角度进行,下面对 Zimbra、OpenId、TeamLab 和 Funambol 4 款典型的 SaaS 开源软件的功能进行分析。

Zimbra 是 VMware 开发的一款 SaaS 开源软件,主要用于邮件管理,利用 Zimbra 构建的云计算平台可以将用户的多个邮箱集中起来,同时它支持日历、通讯录和 Web 文档管理。OpenId 是开源社区推出的一款 SaaS 开源软件,主要用于身份认证,目前很多大型企业都利用它来构建云计算平台,如 Google、Facebook 和 Yahoo! 等都用 OpenId 对它们的用户登录进行认证。TeamLab 是一款用于商业协作和项目管理的 SaaS 开源软件,利用它构建的云计算平台的主要功能包括项目管理和任务图表处理等。Funambol 是业界领先的移动消息(Mobile 2.0 Messaging)提供者,该项目是开源的。利用

Funambol 构建的云计算平台可在移动设备上与存储端同步数据,包含邮件、日历行程、视频及文件等,同时该平台支持对移动数据的备份和管理。

## 4 云计算平台开源软件选择

当对用于构建云计算平台的开源软件进行选择时,首先需要明确平台应提供的服务模型,如果要提供基础设施类服务,则选择 IaaS 服务模型的云计算平台软件;如果需要系统平台或者编程框架环境,则选择 PaaS 服务模型的云计算平台软件;如果需要一些具体的应用,则应该选择基于 SaaS 服务模型的云计算平台软件。在明确了服务模型后,即可进行相应软件的选择。根据第 3 节对各种服务模型开源软件的对比分析结果,针对如何选择构建云计算平台的开源软件问题,我们提出了一个建议方案,如表 2 所列。

表 2 构建云计算平台的开源软件选择方案

需求类别	服务模型	建设需求	软件推荐
基础设施	IaaS	商业应用	Eucalyptus
		IaaS 相关技术研究	OpenNebula
		IaaS 相关应用研究	Nimbus
		构建小型规模云计算环境	ECP
		用户体验	OpenStack
平台环境	PaaS	海量数据管理	Hadoop
		PaaS 相关技术研究和 Java 类开发	CloudFoundry
		脚本类语言开发环境	OpenShift
软件应用	SaaS	SaaS 相关技术研究和 CRM 系统管理	Zimbra
		身份认证应用	OpenId
		商业协作和项目管理应用	TeamLab
		移动设备上同步、备份和管理数据应用	Funambol

### 4.1 IaaS 开源软件选择

对于大型企业而言,隐私性、安全性和可扩展性是企业最关心的问题。在利用 Eucalyptus 所构建的云计算平台中,用户空间与管理空间高度隔离,在映像管理方面将磁盘映像的存储和内存映像存储完全分开,在网络管理方面采用最具特色的管理模式来保证虚拟网络间的隔离,阻止用户的恶意使用和错误部署,因此它具有良好的安全性。另外,Eucalyptus 所采用的三层体系结构模式有利于它通过中间层集群控制器节点来动态地扩展节点和集群,缓解过多工作节点引起云控制节点的开销,方便整个平台的统一管理。因此对于大型企业而言,Eucalyptus 是最好的选择。

对于 IaaS 技术的研究者而言,掌握平台运转情况非常重要。OpenNebula 开发的最初目的就是用于研究。它具有良好的定制性,允许建设者根据特定需求定制多种策略。它的监控器为平台使用者提供平台使用情况的详细监控细节。平台研究者可以利用监控信息修改平台驱动配置文件,开发相应驱动程序来进行云计算相关技术研究的实验。因此,对云基础设施环境相关技术的研究者而言,OpenNebula 软件是构建云计算平台的最好选择。

Nimbus 开发的目的是用于研究。但与 OpenNebula 相比,Nimbus 集成了很多的开源软件,可定制能力相对较低,有几个组件不允许管理员做修改,如用于认证的 Globus<sup>[61]</sup>和用于存储的 Cumulus。它的监控器向平台使用者展示的平台细节不及 OpenNebula,因此安全性略高。它为使用者提供多种编程接口,以便使用者开发 IaaS 相关应用。因此,Nimbus 适合于那些不关注云基础设施内部技术,但对平台定制性有

一定需求的研究者进行 IaaS 相关应用研究。

利用 ECP 构建的云基础设施平台所提供的共享资源池能够帮助平台使用者快速部署 VM 和实时定制 VM。然而由于 ECP 平台中网络管理器对 VM 网络管理的限制和两层体系结构所带来的集群扩展限制,因此它较适用于安装小型的云环境。

与其他几款 IaaS 软件相比,OpenStack 出现时间较晚,但其发展非常迅速,越来越多的企业也开始使用它来建立云基础设施环境<sup>[62]</sup>。它是由服务器托管公司 RackSpace 与美国国家航天航空局 NASA 共同发起的开源项目,最初面向的用户是 NASA。然而利用 OpenStack 软件构建的云基础设施环境的运作机制基本不透明,因此它不适合用于研究。目前,Ubuntu 11.04 服务器版支持 OpenStack 作为 UEC 的基础构架来推广 OpenStack<sup>[63]</sup>。它安装方式简单快捷,如果建设者希望利用开源的 IaaS 软件来体验 IaaS 服务或者对云服务的要求简单,OpenStack 是不错的选择。

#### 4.2 PaaS 开源软件选择

目前许多大型企业都利用 Hadoop 来解决实际应用问题,如 Yahoo! 用它每天处理 32PB 的数据,百度利用它每周处理 3000TB 的数据<sup>[64]</sup>。因此,如果平台使用者有并行计算、海量信息处理和海量数据存储管理方面的需求,无论从研究还是应用的角度,利用 Hadoop 软件来构建云计算平台对平台建设者都是不错的选择。Hadoop 软件旗下有许多子项目,建设者可以根据特定需求选择合适的子项目。

利用 CloudFoundry 构建的云计算平台可给使用者提供软件开发、测试和运行维护一套完整的平台环境,这种统一的管理方式有利于 PaaS 平台的研究。同时,利用 CloudFoundry 构建的云计算平台所支持的 Java 技术成熟,平台使用者可以在该平台上进行 PaaS 平台相关技术的研究和 Java 类语言的相关开发。

利用 OpenShift 构建的云计算平台能够支持多种编程框架和脚本语言。OpenShift 可以运行在 IaaS 平台上,并随着 IaaS 平台的扩展而动态扩展。但是目前它并未完全开源,建设者可以参照 3.2 节所介绍的 OpenShift 的特征,根据实际需求决定是否选择 OpenShift 来部署软件开发环境。

#### 4.3 SaaS 开源软件选择

对 SaaS 平台技术研究者而言,目前 Zimbra 在开源的 SaaS 软件中发展相对成熟,资料比较丰富,所以对于 SaaS 服务模型的研究者来说,Zimbra 是一个不错的选择。

从提供应用的角度看,SaaS 所提供的应用可以分为 3 类<sup>[65]</sup>:第一类是标准的应用,如利用 Zimbra 构建的云计算平台所提供的邮件管理功能;第二类是为某个领域的用户开发的客户应用,如利用 TeamLab 构建的云计算平台提供的商业协作和项目管理功能;第三类是在平台层上开发的满足用户需求的多元应用,如利用 Funambol 构建的云计算平台所提供的同步数据功能。表 2 中列出了几种典型的 SaaS 开源软件所提供的应用,建设者可根据应用需求选择特定的 SaaS 开源软件。

在明确所需服务以及各款云计算平台开源软件所能解决的问题后,云计算平台建设者即可参考以上的对比分析和选择方案选择合适的软件构建符合特定需求的云计算平台。在实际应用中,建设者也可以将多种服务模型混合使用来构建

云环境。利用 IaaS 开源软件构建基础设施环境,PaaS 开源软件利用基础设施环境提供应用运行的平台,SaaS 开源软件在该基础设施环境和平台上提供具体的应用。例如,波多黎哥大学利用 Eucalyptus 1.6 部署了一套云基础设施环境,并在此基础设施上利用 Hadoop 0.2 的 MapReduce 框架来分析海量数据。除此之外,他们还在该基础设施平台上部署 Django-python<sup>[66,67]</sup>的 PaaS 平台,用于 Web 应用开发<sup>[68]</sup>。弗洛里达大学、芝加哥大学和普度大学共同利用 Nimbus 部署了一套提供基础设施的云环境,在上面部署 Hadoop 平台来管理生物信息学应用<sup>[69]</sup>。由此可见,构建云环境来解决实际问题时也可以将多种服务模型的云计算平台软件混合使用,以满足实际需求。

**结束语** 为了弄清如何有效利用开源软件构建云计算平台的问题,我们对现有的用于构建云计算平台的开源软件进行了研究。在对 3 种服务模型的云计算平台开源软件体系结构进行剖析的基础上,分别对 IaaS 服务模型的开源软件 Eucalyptus、OpenNebula、Nimbus、ECP 和 OpenStack, PaaS 服务模型的开源软件 Hadoop、CloudFoundry 和 OpenShift 以及 SaaS 服务模型的开源软件 Zimbra、OpenId、TeamLab 和 Funambol 进行对比分析。通过对比分析,可以得出以下结论:

(1)在现有的基础设施服务类开源软件中,Eucalyptus 适合大型企业应用,OpenNebula 适合 IaaS 相关技术研究,Nimbus 适合与 IaaS 相关的应用研究,ECP 适合构建小型规模的云计算环境,OpenStack 适合用户体验。

(2)在现有的平台环境服务类开源软件中,Hadoop 适合海量数据管理,CloudFoundry 适合 PaaS 相关技术研究以及与 Java 编程语言和 Java 编程框架有关的开发,OpenShift 适合脚本类语言开发。

(3)在现有的软件应用服务类开源软件中,Zimbra 适合 SaaS 相关技术研究和 CRM 系统管理,OpenId 适合身份认证相关应用,TeamLab 适合商业协作和项目管理应用,Funambol 适合移动设备上同步、备份和管理数据的相关应用。

#### 参 考 文 献

- [1] Bruce P. The Open Source Definition [C]// Open Sources: Voices from the Open Source Revolution. 1999:171-188
- [2] Wind S. Open Source Cloud Computing Management Platforms Introduction, Comparison, and Recommendations for Implementation [C]// 2011 IEEE Conference on Open Systems (ICOS 2011). September 2011:175-179
- [3] Cerbelaud D, Garg S, Huylebroeck J. Opening The Clouds: Qualitative Overview of the State-of-the-art Open Source VM-based Cloud Management Platforms [C]// Proceedings of the 10th ACM/IF-IP/USENIX International Conference on Middleware. 2009:1-8
- [4] ECP Home Page [EB/OL]. <http://www.enomaly.com/>, 2011
- [5] Eucalyptus Home Page [EB/OL]. <http://www.eucalyptus.com/>, 2011
- [6] OpenNebula Home Page [EB/OL]. <http://www.opennebula.org/>, 2011
- [7] oVirt Home Page [EB/OL]. <http://www.ovirt.org/>, 2011
- [8] Sempolinski P, Thain D. A Comparison and Critique of Eucalyptus, OpenNebula and Nimbus [C]// IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science. 2010: 417-

- [9] Nimbus Home Page[EB/OL]. <http://www.nimbusproject.org/>, 2011
- [10] Peng J, Zhang X, Lei Z, et al. Comparison of several cloud computing platforms[C]// Proc. of the 2nd International Symposium on Information Science and Engineering, 2009;23-27
- [11] Abicloud Home Page [EB/OL]. <http://wiki.abiquo.com/display/ABI20/Abiquo+Documentation+Home>,2011
- [12] Rimal B P, Choi E, Lumb I. A Taxonomy and Survey of Cloud Computing Systems[C]// Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC, 2009;44-51
- [13] Endo P T, Gon G E, Kelner J, et al. A Survey on Open-source Cloud Computing Solutions[C]//Brazilian Symposium on workr Networks and Distributed Systems, May 2010;3-16
- [14] Heckel P C. Hybrid Clouds: Comparing Cloud Toolkits [D]. Seminar Paper Business Informatics, University of Mannheim, Mannheim,2010
- [15] Cordeiro T, Damalio D, Pereira N, et al. Open Source Cloud Computing Platforms[C]// 9th International Conference on Grid and Cloud Computing, Nanjang, China,2010;366-371
- [16] Gonçalves G E, Endo P T, Cordeiro T D, et al. Resource Allocation in Clouds: Concepts, Tools and Research Challenges[C]// Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, 2011;197-240
- [17] OpenStack Home Page[EB/OL]. <http://www.OpenStack.org/>, 2011
- [18] Hadoop Home Page [EB/OL]. <http://hadoop.apache.org/>, 2011
- [19] CloudFoundry Home Page [EB/OL]. <http://www.cloudfoundry.com/>,2011
- [20] OpenShift Home Page[EB/OL]. <https://OpenShift.redhat.com/app/>,2011
- [21] Zimbra Home Page[EB/OL]. <http://www.zimbra.com/>,2011
- [22] OpenId Home Page[EB/OL]. <http://openid.net/>,2011
- [23] TeamLab Home Page[EB/OL]. <http://www.teamlab.com/>, 2012
- [24] Funambol Home Page[EB/OL]. <http://www.funambol.com/>, 2012
- [25] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing [R]. Berkeley, USA; Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley,2009
- [26] Buyya R, Yeo C S, Venugopal S. Market-Oriented Cloud Computing: Vision, Hype, and Reality for Delivering IT Services as Computing Utilities[C]//The 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, Dalian, China,2008;5-13
- [27] What Cloud Computing really means[EB/OL]. <http://www.infoworld.com/d/cloud-computing/what-cloud-computing-really-means-031>,2011
- [28] 黄瑛,石文昌. 云基础设施安全性研究综述[J]. 计算机科学, 2011,38;24-30
- [29] Schweitzer E J. Reconciliation of the cloud computing model with US federal electronic health record regulations [J]. Journal of the American Medical Informatics Association,2012,19;161-165
- [30] OpenNebula use case[EB/OL]. <http://tinyurl.com/cernopennebula>,2011
- [31] OpenNebula use case[EB/OL]. <http://tinyurl.com/dgridopennebula>,2011
- [32] Bradshaw R, Zbiegpiel P T. Experiences with eucalyptus; deploying an open source cloud[C]// Proceedings of the 24th international conference on large installation system administration. LISA '10, USENIX Association, Berkeley,2010;1-16
- [33] Keahey K, Freeman T. Science Clouds: Early experiences in Cloud Computing for Scientific Applications[C]//Proceedings of Cloud Computing and Its Applications 2008. Chicago, IL,2008;16
- [34] Enomaly use case[EB/OL]. <http://www.enomaly.com/Customers.clients.0.html>,2011
- [35] OpenId consumer scenarios [EB/OL]. <http://openid.net/2010/10/12/openid-in-the-enterprise-saas-market/>,2010
- [36] Hadoop use case [EB/OL]. <http://wiki.apache.org/hadoop/PoweredBy>,2011
- [37] Mell P, Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing [R]. National Institute of Standards and Technology, Information Technology Laboratory,2009
- [38] Sotomayor B, Montero R S, Llorente I M, et al. Virtual infrastructure management in private and hybrid clouds[C]//IEEE Internet Computing, 2009;14-22
- [39] Vaquero L M, Rodero-Merino L, Buyya R. Dynamically scaling applications in the cloud [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review,2011,41;45-52
- [40] XCP Home Page [EB/OL]. <http://www.xen.org/products/cloudxen.html>,2011
- [41] W Jin-peng, Z Xiao-lan, Ammons G, et al. Managing Security of Virtual Machine Images in a Cloud Environment [C] // The ACM workshop on Cloud computing security. Toronto, Canada, November 2009;91-96
- [42] VLAN Grundlagen[EB/OL]. [http://www.thomas-krenn.com/de/wiki/VLAN\\_Grundlagen](http://www.thomas-krenn.com/de/wiki/VLAN_Grundlagen),2012
- [43] Rosen E, Rekhter Y. RFC 2547 BGP/MPLS VPNs [S]. Internet Engineering Task Force (IETF), March 1999
- [44] VMware workstation Home Page [EB/OL]. <http://www.vmware.com/products/workstation/>,2011
- [45] XEN hypervisor Home Page [EB/OL]. <http://xen.org/products/xenhyp.html>,2011
- [46] Fenn M, Murphy M A, Martin J. An Evaluation of KVM for Use in Cloud Computing[C]// ACM Transactions on Computational Logic. Month 2011;1-7
- [47] Yellin F, Lindholm T. The Java Virtual Machine Specification [M]. Addison Wesley,1998;7-11
- [48] Bresnahan J, LaBissoniere D, Freeman T, et al. Cumulus: An Open Source Storage Cloud for Science[C]// ScienceCloud 2011. San Jose, CA, June 2011;25-32
- [49] Tkac A. VNC compilation against Xorg 1.4 [N]. 2008
- [50] Daniel N, Rich W, Chris G, et al. The Eucalyptus Open-Source Cloud-Computing System[C]// Proceedings of the 2009 9th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid. May 2009;124-131
- [51] Eucalyptus project[EB/OL]. Eucalyptus Administrator's Guide,2011
- [52] OpenNebula project [EB/OL]. OpenNebula 2.2 Key features and benefits march 2011-rev20110511,2011

在 UML/SysML 的扩展机制下,可实现 UML 模型和 Simulink 模型的融合,方法如下。

a) 首先设置 UML 模型的 Profile 文件。为了将 Simulink 模块添加到 UML 模型的架构,首先需要添加 Simulink 或 SimulinkInC Profile 文件到 UML 工程。

b) 为了满足 4.2 节的同步模型,在 UML 模型架构中,每个 Simulink 模型由多个“Simulink 模块”组成。这些 Simulink 模块可以内部交互,也可以与 UML 模型对象交互。为这些 Simulink 模块加上 Input/Output 端口,以实现将其封装成 UML 模型<sup>[8]</sup>。当数据在一个封装后的 UML 模型的各个 Simulink 模块间进行信息交互时,UML 模型对外表现像“黑匣子”一样;当 Simulink 模块与 UML 模型信息交互时,UML 模型才会有所作动,退出“黑匣子”的状态,这样的数据交互与 Simulink 模块间的数据交互方式是一致的。图 10 为 Simulink 模块被封装成 UML 模型的结构图。

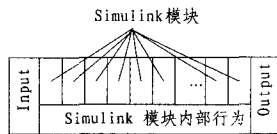


图 10 Simulink 模块封装成 UML 模型的结构图

c) 当包含有 Simulink 模型的 UML 模型生成代码时,Simulink/RTW 为 Simulink 模型生成的代码会被插入到 UML 模型自身机制生成的代码架构内;当 Simulink 模型进行修改时,只需要同步更新嵌入到 UML 模型的 Simulink 模型。

**结束语** 本文关注于 CPS 基本特性和仿真相关的建模思想,介绍了 CPS 的概念,对 CPS 的重要特征和关键属性进行了分析,将 CPS 一体化模型精化为计算实体、物理实体和交互实体 3 种基本类型并对其进行深层次剖析。为了针对不同实体的特性进行精准建模,我们研究为计算实体构建基于事件驱动的离散模型,为物理实体构建基于动态连续时间坐标的连续模型,为实现异构模型良好协同,在对各不同实体进行高度抽象的基础上,分析了 3 种不同的 UML/Simulink 模型融合策略。最后给出了 1 个基于 UML/SysML 扩展机制下 CPS 节点模型的 UML/Simulink 协同仿真,并针对简化后的无人机模型进行实例化分析,采用 UML/Rhapsody 对计算

实体构建离散事件系统模型,Matlab/Simulink 对物理实体构建连续系统模型,以将 Simulink 模块集成到 UML 模型的方式实现了异构模型的融合,具体实施 CPS 仿真框架下的各实体模型的细节构建将是下一步研究设计的重点。

## 参考文献

- [1] 何积丰. Cyber-physical Systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010,6(1):25-29
- [2] Lee E A. Cyber Physical System; Design Challenges[C]//11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing(ISORC). May 2008;363-369
- [3] Xie Le, Ilic M D. Module-based Modeling of Cyber-Physical Power Systems[C]//The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCS). Aug. 2008; 513-518
- [4] Benveniste A. Loosely Time-Triggered Architectures for Cyber-Physical Systems[C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). 2010;3-8
- [5] Nicolescu G, Boucheneb H, Gheorghe L, et al. Methodology for Efficient Design of Continuous/Discrete-Events Co-Simulation Tools[C]// High Level Simulation Languages and Applications (HLSLA). SCS, San Diego, CA, 2007; 172-179
- [6] Lee E A. CPS Foundations[C]// Design Automation Conference (DAC). ACM, June 2010;737-742
- [7] Brisolaro L B, Oliveira M F S, Nascimento F A, et al. Using UML as a front-end for an efficient Simulink-based multithread code generation targeting MPSoCs[C]//UML-Soc'07. San Diego, USA, June 2007
- [8] Brisolaro L B, Oliveira M F S, Redin R, et al. Using UML as Front-end for Heterogeneous Software Code Generation Strategies[C]// Design, Automation and Test in Europe (DATE). 2008;504-509
- [9] 刘扬,李亚芬,王普. 模型驱动的用例自动生成框架[J]. 计算机工程, 2011,1(1):39-44
- [10] 郭亮,缪准扣,王哲,等. UML 模型到 FSM 模型的转换[J]. 计算机科学, 2009,7(7):113-116
- [11] Hooman J, Mulyar N, Posta L. Coupling simulink and uml models[C]//Proc. Symposium FORMS/FORMATS. 2004;304-311
- [12] OpenStack use stories [EB/OL]. <http://OpenStack.org/user-stories/>, 2011
- [13] Pepple K. Deploying OpenStack [M]. O'Reilly Media, 2011
- [14] Yahoo with hadoop[EB/OL]. <http://blog.netoearth.com/html/201007/hadoop>, 2011
- [15] 王庆波,金祥,何乐,等. 虚拟化与云计算[M]. 北京:电子工业出版社, 2010
- [16] Django-python Home Page [EB/OL]. <http://www.djangoproject.com/>, 2011
- [17] Andrew J Y. Tutorial; Eucalyptus and Hadoop on FutureGrid [EB/OL]. <http://salsahpc.indiana.edu/b649/slides/b649-eucalyptus-hadoop.pdf>, 2011
- [18] Greer M, Rodriguez-Martinez M, Seguel J. Open Source Cloud Computing Tools; A Case Study with a Weather Application[C]// 2010 IEEE Cloud Computing Conferene. Miami, FL, 2010; 443-449
- [19] Matsunaga A, Tsugawa M, Fortes J. CloudBLAST; Combining MapReduce and Virtualization on Distributed Resources for Bioinformatics Applications [C]// Fourth IEEE International Conference on eScience. Indiana, USA, 2008;222-229
- [20] Kate K, David L, John B, et al. Nimbus Tutorial[R]. CloudCom 2010. Indianapolis, IN, December 2010
- [21] Keahey K. Nimbus; Cloud Computing for Science[R]. HPAGC 2011. Chicago, IL, April 2011
- [22] ECP project. Intel cloud Builder[EB/OL]. [http://www.enomaly.com/fileadmin/docs/Intel\\_Cloud\\_Builder.pdf](http://www.enomaly.com/fileadmin/docs/Intel_Cloud_Builder.pdf), 2011
- [23] Bret P. OpenStack Tutorial[R]. IEEE Cloud Com, 2010
- [24] OpenStack Project[EB/OL]. OpenStack-Compute-datasheet, 2011
- [25] OpenStack Project [EB/OL]. OpenStack Object Storage Administrator Manual, 2011
- [26] Cloud Man; design document[EB/OL]. <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?resId=0&materialId=0&confId=153265>, 2011
- [27] VMware's CloudFoundry and Red Hat's OpenShift-Compare and Contrast [EB/OL]. <http://www.virtualizationpractice.com/vmwares-cloudfoundry-and-red-hats-openshift-compare-and-contrast-10567/>, 2011
- [28] Globus Alliance[EB/OL]. <http://www.globus.org/>, 2011

(上接第 7 页)