

异构云计算平台业务迁移

魏峰¹, 丁飞², 焦鹏举¹, 李杨¹, 陈焱山¹, 张登银²

(1. 中移(苏州)软件技术有限公司, 江苏 苏州 215000;
2. 南京邮电大学江苏省宽带无线通信和物联网重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 随着 5G 通信技术、“互联网+”和物联网的快速发展, 云计算作为基于互联网的虚拟资源管理和分布式计算的技术模式, 以动态按需和可度量的方式为用户提供服务, 将业务平台迁移至云计算平台可实现快速部署业务, 有效节约了业务创新及运营成本。所提方案在研究基于云计算平台的业务迁移技术的基础上, 以中国移动基于 OpenStack 的云计算架构为例, 对离线迁移、基于平台功能在线迁移、基于块级别在线业务迁移和基于文件级别在线业务迁移等主流业务迁移方案的技术原理和关键点进行分析, 同时给出了通用业务迁移流程和方法, 最后通过实际平台对 3 类在线业务迁移方案进行实验验证, 分析各方案的技术优势及适用场景, 从而指导未来业务迁移的生产实践。

关键词: 云计算; 业务迁移; 异构平台

中图分类号: TP316

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00161

Service migration of heterogeneous cloud computing platform

WEI Feng¹, DING Fei², JIAO Pengju¹, LI Yang¹, CHEN Yanshan¹, ZHANG Dengyin²

1. China Mobile (Suzhou) Software Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China
2. Jiangsu Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Internet of Things,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: With the rapid development of 5G communication technology, Internet+ and the Internet of things (IoT), cloud computing as an Internet-based virtual resource management and a distributed computing technology, provides services to users in a dynamic, on-demand and measurable manner. The solution of migrating the service platform to the cloud computing platform can realize rapid service deployment and effectively save service innovation and operating cost. With the research of the cloud computing platform-based service migration technology, the China Mobile's OpenStack-based cloud computing architecture was taken as an example. The technical principles and core points of the mainstream service migration schemes were analyzed, such as offline migration, online migration based on platform functions, online service migration based on the agent block level and online service migration based on agent file level. The general service migration process and method were also given. Finally, three types of online migration schemes were experimentally verified through the actual platform. The technical advantages and adaptation scenarios were analyzed separately to guide the production practice of future business migration.

Key words: cloud computing, service migration, heterogeneous platform

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2020-02-14

通信作者: 丁飞, dingfei@njupt.edu.cn

基金项目: 教育部中国移动科研基金资助项目 (No.MCM20170205); 工业和信息化部通信软科学研究项目 (No.2019-R-26); 江苏省“六大人才高峰”资助项目 (No.DZXX-008); 南京邮电大学科研基金资助项目 (No.NY217146, No.NY220028)

Foundation Items: The Research Foundation of Ministry of Education-China Mobile (No.MCM20170205), The Communication Science Research Project of Ministry of Industry and Information Technology of China (No.2019-R-26), The “Six Talent Peaks” Research Foundation of Jiangsu Province (No.DZXX-008), The NUPTSF (No.NY217146, No.NY220028)

1 引言

云计算 (cloud computing) 在全球的迅速兴起, 为我国信息技术产业实现创新突破和跨越式发展提供了良好的战略机遇。云计算是一种通过网络统一组织和灵活调用各种信息与通信技术 (ICT, information and communication technology) 资源, 实现大规模计算的信息处理方式^[1]。云计算利用分布式计算和虚拟资源管理等技术, 通过网络将分散的 ICT 资源 (包括计算与存储、应用运行平台、软件等) 集中起来形成共享的资源池, 并以动态按需和可度量的方式为用户提供服务。

美国制定了“云敏捷”战略, 致力于推行云解决方案, 为联邦政府信息服务提供有力的技术支持; 加拿大政府发布了更新后的“云优先采用”策略, 明确了政府部门优先选择公有云服务; 智利政府发布“云优先”行政命令, 推行政务迁移上云服务, 从而降本增效, 提高信息化服务水平; 此外, 新西兰、阿根廷、菲律宾等国家也纷纷发布相关政策, 要求政府 ICT 基础设施优先应用和部署云服务。2018年8月, 我国发布《推动企业上云实施指南(2018—2020年)》, 从总体要求、科学制定部署模式、按需合理选择云服务、稳妥有序实施上云、提升支撑服务能力、强化政策保障等方面提出了推动企业上云的工作要求和实施建议^[2]。

目前, 以 OpenStack、Hadoop 等为代表的开源项目都已经建立各自的产业生态。以 OpenStack 为例, 全球超过 130 个国家正在参与其开源开发和服务, 其中, 既有 IBM (International Business Machines Corporation)、Intel (Integrated Electronics Corporation)、HP (Hewlett-Packard)、EMC、RedHat、VMware 等 IT 领先企业, 也有思科系统公司、华为技术有限公司、Juniper 等传统网络设备制造商, 还有一批依赖于 OpenStack 平台的创新企业。自 2014 年以来, 基于 KVM (kernel-based virtual machine) 的基础设施云在我国快速发展, 催生了许多大体量的云服务商, 如阿里云、华为云、移动云等。基于云计算架构的业务支撑体系如图 1 所示。

基于云计算的开放平台给传统行业 (如政务、教育、金融等) 创新提供了强大助力, 特别是中/小型企业、个人开发者等都不需要搭建云平台以及维护自身互联网数据中心 (IDC, Internet data center) 机房, 在便于开发和后期维护管理的基础上,

大幅度节约了业务创新及运营成本。通过将业务迁移至云平台, 实现业务能力开放化、互联网化; 在演进模式方面, 以“平台+核心产品”聚集客户, 形成示范应用, 然后共享客户, 推广更丰富的服务。以阿里云推出的“智能秒停系统”为例, 该系统将停车物联网服务迁移部署于云计算平台, 是利用阿里云的基础资源和集成的业务能力共同打造的典型示范案例。在阿里云计算开发服务架构中采用物联网开发套件 (支持 LoRa 2.0 和 NB-IoT 技术等) 进行车位硬件节点开发, 打通了与高德地图和支付宝的接口, 融合云计算、物联网、人工智能 (AI, artificial intelligence)、大数据、无感支付等技术, 上线了非现场执法、全域停车调度、信用停车 3 类典型服务, 可在 50 s 内向车主反馈违停短信, 并同时推荐最佳停车位。

云计算平台的开源化和虚拟化对信息化系统的部署和服务支撑带来了便捷, 如何对存量业务进行同步迁移^[3-4]是一个重要研究方向。本文首先介绍了基于 OpenStack 的云计算架构, 然后对 4 种主流业务同步的工作原理进行介绍, 最后搭建了测试环境, 通过迁移实测对主流业务同步迁移方案进行对比, 评估各方案的优缺点及适用场景, 对未来业务上云方案的实施具有指导意义和参考价值。

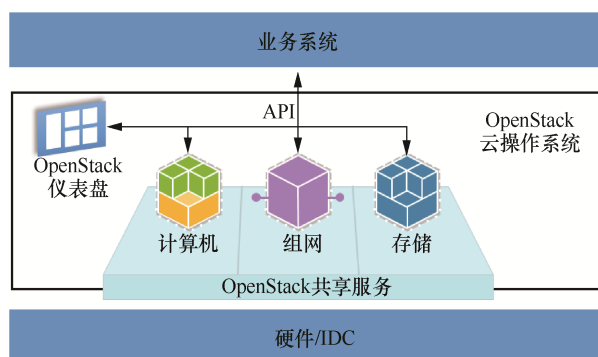


图 1 基于云计算架构的业务支撑体系

2 基于云计算平台的业务迁移技术

当前, 云计算处于快速发展阶段, 技术产业创新不断涌现, 企业上云成为趋势, 云管理服务、智能云和边缘云等市场开始兴起^[5]。AWS (Amazon web services) 为其云数据迁移定义了 6 类迁移模式, 主要包括保留 (retain)、停用 (retire)、更换主机 (rehost)、重新购买 (repurchase)、更换平台 (replatform) 和重构/重新架构 (refactor/rearchitect)。

在上述迁移模式中，有的业务强相关，如更换平台和重构/重新架构等；有的生产不可用，如保留和停用。其中，业务无关且生产可用主要通过业务重新部署（重新购买）和迁移承载业务的操作系统（更换主机）两种方式进行业务迁移，其中，通过更换主机方式进行业务在线迁移是本文描述的重点。

业务重新部署主要是指在保证源平台业务可用的情况下，在目标平台上重新部署一套业务，在部署完成后，将源平台的存量业务资源迁移至目标平台，最终达到业务迁移的目的^[3,6]。这是一种最容易想到的方法，也是资源投入最大的业务迁移方式。考虑投入产出比，这种方式一般不推荐使用。此外，该方式严重依赖于应用提供方，不同的应用对应的业务迁移方式完全不同，本文不做重点阐述。

通过迁移承载业务的操作系统的业务迁移方式即基于系统的业务迁移^[7-8]，主要关注两个方面：系统的源平台和目标平台。源平台的种类较多，常见的源平台包括传统物理机、VMware 平台、Xen 虚拟化平台、Hyper-V 平台和基于 KVM 的各种国产云平台；目标平台的种类比较少，主要包括基于 KVM 的虚拟化平台和基于 ESXI 的 VMware 平台等^[9-11]。

基于系统的业务迁移有多种分类方式^[12-13]，其中，根据承载业务的服务器是否需要停机分类可分为在线迁移和离线迁移；根据业务是否支持增量迁移分类，可分为增量迁移和全量迁移；根据是否需要在源服务器中安装代理分类，可分为基于代理的

迁移和非代理迁移。上述分类的标准尺度不同，但都能说明相关迁移方案的特征^[14]。

基于系统的业务迁移方案属于生产级别的实施方案，对于政企客户和第三方开发者来说是首选方案。本文将以业务迁移的实现方式对基于系统的业务迁移进行归类，主要分为离线迁移、基于平台功能在线迁移、基于块级别在线业务迁移、基于文件级别在线业务迁移。针对上述 4 种迁移方案的原理、特点进行具体介绍，分析各种迁移方案的实施原理，从而指导未来业务迁移的生产实践。各种迁移方案的特点对比如表 1 所示，各种迁移方法的适用场景如表 2 所示。

3 基于 OpenStack 的云计算系统架构

云计算系统的底层是虚拟化层，为了实现云计算的低成本目标，云计算系统大多采用 x86 服务器，并通过虚拟化提高服务器资源的利用率。虚拟化层的上一层是服务层，该层主要提供资源管理、租户管理、各类服务等。顶层是资源池管理平台 and 私有云管理平台。基于 OpenStack 的云计算系统架构如图 2 所示。

云计算内部处理逻辑框架如图 3 所示，由图 3 可以看出，云计算是将存储、计算、网络、镜像和编排等服务标准化，在获得鉴权通过的情况下可快速开放给第三方，同时提供监控和告警等服务。

虚拟化逐渐成为服务器操作系统的一项标准配置，Linux 标准内核包括 KVM 虚拟化模块，微软 Windows 2008 自带 Hyper-V 等。同时，x86 虚拟化技术的开源趋势越来越明显，开源 KVM 等虚拟

表 1 各种迁移方案的特点对比

迁移方式	业务相关	停服时长	增量迁移	侵入性	影响程度
离线迁移	业务无关	数据/带宽	否	否	大
基于平台功能在线迁移	业务无关	分钟级	是	否	小
基于块级别在线业务迁移	业务无关	分钟级	是	是	小
基于文件级别在线业务迁移	业务无关	分钟级	是	是	小

表 2 各种迁移方法的适用场景

迁移方式	适合业务场景
离线迁移	测试环境、准生产环境
基于平台功能在线迁移	源平台为 VMware、Hyper-V
基于块级别在线业务迁移	源端除物理机以外的生产环境，业务为数据库
基于文件级别在线业务迁移	源端为物理机或其他虚拟化平台，且此工具支持磁盘缩容

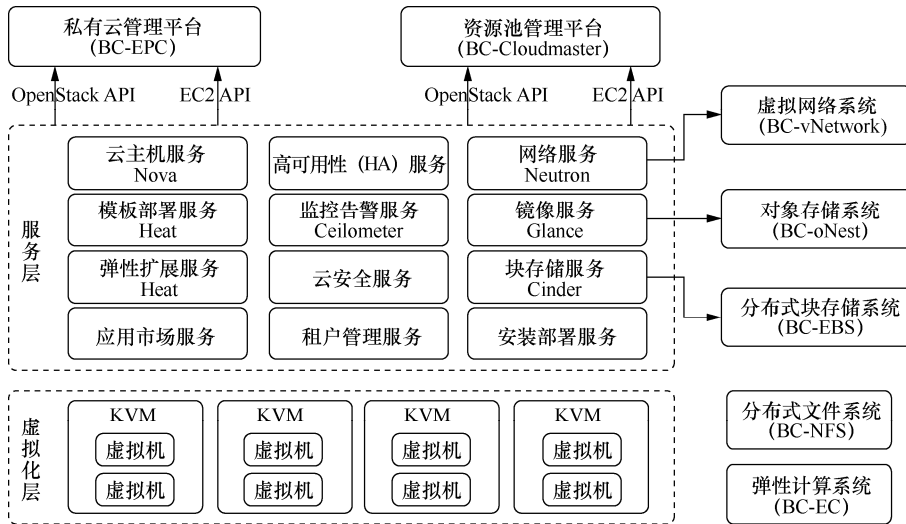


图 2 基于 OpenStack 的云计算系统架构

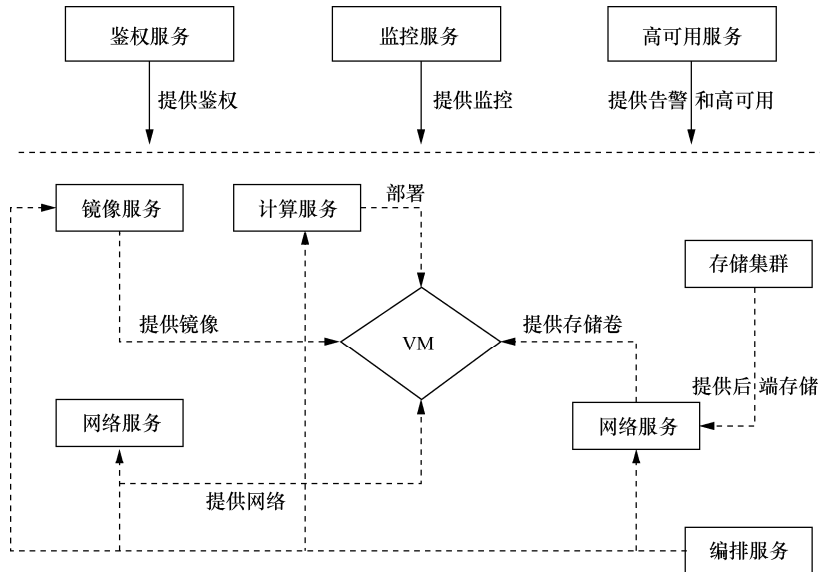


图 3 云计算内部处理逻辑框架

化技术得到了 RedHat、IBM 等服务器厂商的支持，应用越来越广泛。目前，以 x86 架构为代表的服务器是云计算解决方案的主流。由于对节能、智能等应用的需求，集成 ARM (advanced RISC machine)、MIPS (million instructions per second) 等 RISC (reduced instruction set computing) 架构的低功耗服务器将是未来主要的发展方向。

4 业务迁移上云原理

业务迁移上云是指将物理机或虚拟化服务器上承载的业务迁移到云计算系统平台上，业务的使用者可以按需使用计算、存储、网络资源，不需要

对基础设施进行维护^[15-16]。

下面主要介绍基于系统的业务上云的实现原理，并在说明各种迁移方法原理的基础上进行场景分析。在开始迁移前，服务器的有效数据量即服务器中的实际数据量；在迁移过程中，由于应用还在运行，因此在迁移过程中还会产生业务数据，即增量数据。对于政企客户和第三方开发者来说，生产级别的业务迁移方案为首选，而非生产级别的迁移方法、业务强相关的迁移方法本文不做研究。

4.1 离线迁移

离线迁移是指在业务迁移过程中关闭源服务器，将数据导出并修改数据格式，然后在目标平台

启动。关闭源服务器意味着业务需要停服，这种迁移方式对业务的影响程度较大。

离线迁移最常用的是 RedHat 的 virt-p2v 和 virt-v2v。虽然，目前业务上云迁移主要以在线迁移为主，但上述两个工具仍然经常被使用。以 virt-v2 为例^[17]，virt-v2 实现原理如图 4 所示。离线迁移主要解决设备的驱动匹配和镜像磁盘格式转换等问题，具体如下。

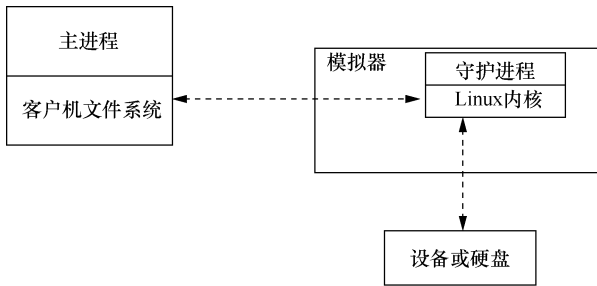


图 4 virt-v2 实现原理

1) 设备的驱动：不同平台使用的磁盘、网络等设备驱动是不同的，常见的物理机主要使用 SCSI 驱动^[18]，KVM 使用 virtio 驱动^[19]。在转换过程中，需要把驱动注入操作系统的镜像中，以保证迁移完成后，操作系统在目标平台正常启动。

2) 镜像磁盘格式^[20]：不同虚拟化平台使用不同的镜像磁盘格式，物理机的磁盘格式是 raw 格式，KVM 常用的磁盘格式是 qcow2，VMware 常用的磁盘格式是 vmdk。因此，在业务迁移过程中，需要完成磁盘镜像格式的适配^[21]。

virt-p2v 和 virt-v2v 主要基于 libguestfs 实现，实现方式类似于操作系统重新生成驱动文件，具体流程如下^[22]。

- 1) 程序通过执行 guestfish-a 启动一个主进程。
- 2) 主进程在运行过程中，会创建一个子程序。

在子程序中，利用 libvirt 启动一个虚拟机。

3) 在虚拟机初始化过程中，自启动一个后台进程即守护进程，守护进程能够实现和 Linux 内核及一系列用户空间的工具（如 LVM、ext2 等）交互完成特定的功能。

4) 主程序中的客户机文件系统和虚拟机中的守护进程通过远程过程调用(RPC, remote procedure call) 进行交互。

5) 由于子程序中的守护进程调用内核接口，完成磁盘驱动的重新生成和加载。

6) 完成磁盘驱动加载后，利用模拟器进行磁盘格式转换。

4.2 基于平台功能在线迁移

基于平台功能的在线迁移利用平台快照功能实现业务迁移^[23-24]，其主要应用于源平台为 VMware 和 Hyper-V 平台的业务迁移中。在 OpenStack 同 Ceph 配合使用的场景下，也可以使用该方式^[25]。下文将以 VMware 虚拟机迁移到基于 KVM 的 OpenStack 的虚拟化平台为例，说明其业务迁移的实现原理^[26-27]，基于平台功能迁移工作原理如图 5 所示，迁移实现的具体过程如下。

1) 调用 OpenStack Cinder API 创建待迁移主机的相关资源。

2) 调用 VMware API 生成 ROW (reference) 快照，并进行多次快照，将生成的增量快照同步助手虚拟机节点。

3) 调用 VMware API 将多次生成快照，利用 CBT (computer based training) 技术追踪生成完整的镜像，然后完成驱动的注入和格式转换。

4) 利用此镜像（系统盘和数据盘）调用 OpenStack 的接口完成目标虚拟机的创建，然后验证业务的可行性。

该方案特点包括：1) 源端零干扰，VMware 源环境的虚拟机不需要安装代理。2) 系统不需要停

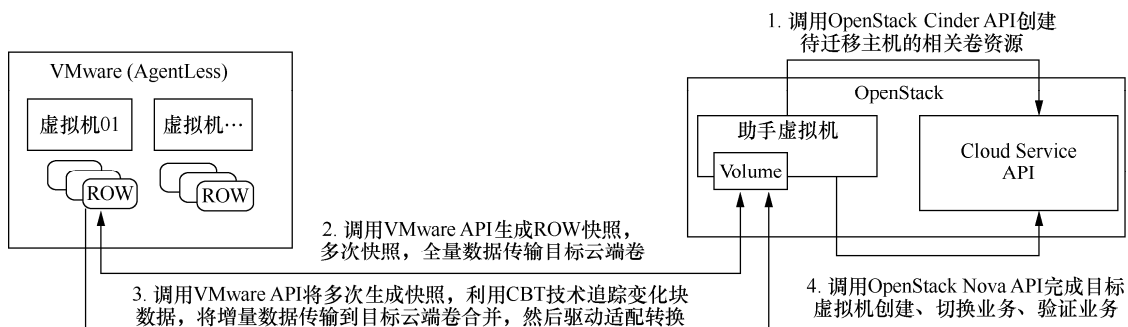


图 5 基于平台功能迁移工作原理

机、业务分钟级中断，以块级保护方式为基础，在保证业务系统连续性的基础上完成迁移。3) 目标端不需要操作，在目标云平台不需要提前预启动虚拟机以及安装配置系统。4) 此方法只适合源端为VMware 的虚拟化平台。

4.3 基于块级别在线业务迁移

基于块级别在线业务迁移如图 6 所示，其在源端的云主机中安装代理，然后通过代理辅助进行块级别数据同步，将数据同步到目标节点。

该方案的核心原理为^[28-30]：采用磁盘逻辑重建技术，首先通过代理分析源磁盘逻辑结构，根据源磁盘逻辑结构在目标端重建，重建后将源端的有效数据块写入目标端磁盘对应扇区，确保源端与目标端逻辑上完全一致；将逻辑重建过程中变化的数据块记录在 BitMap 中，目标重建完成后读取 BitMap 地址表，让代理寻址到相应扇区读取数据块并复制

到目标对应扇区。软件中内置设备驱动库，目标端上线前将从驱动库中自动更新最佳驱动，保证迁移完成后目标系统可正常启动。

该方案的特点包括：1) 源端安装代理，需要侵入系统；2) 块级别数据同步，效率高；3) 系统不停机；4) 增量数据同步，分钟级业务停服。

4.4 基于文件级别在线业务迁移

基于文件级别在线业务迁移方案在源服务器中安装代理，在目标端通过中转虚拟机辅助生成磁盘镜像。该代理会通过 rsync 的增量数据同步能力，将文件同步到目标节点^[31-33]。以中国移动的 BC-SMS 为例说明其技术实施框架，基于文件级别在线业务迁移如图 7 所示。处理逻辑主要分为 3 个阶段，具体如下。

4.4.1 数据复制阶段

- 1) 客户触发迁移命令，执行 SMS-agent 脚本。

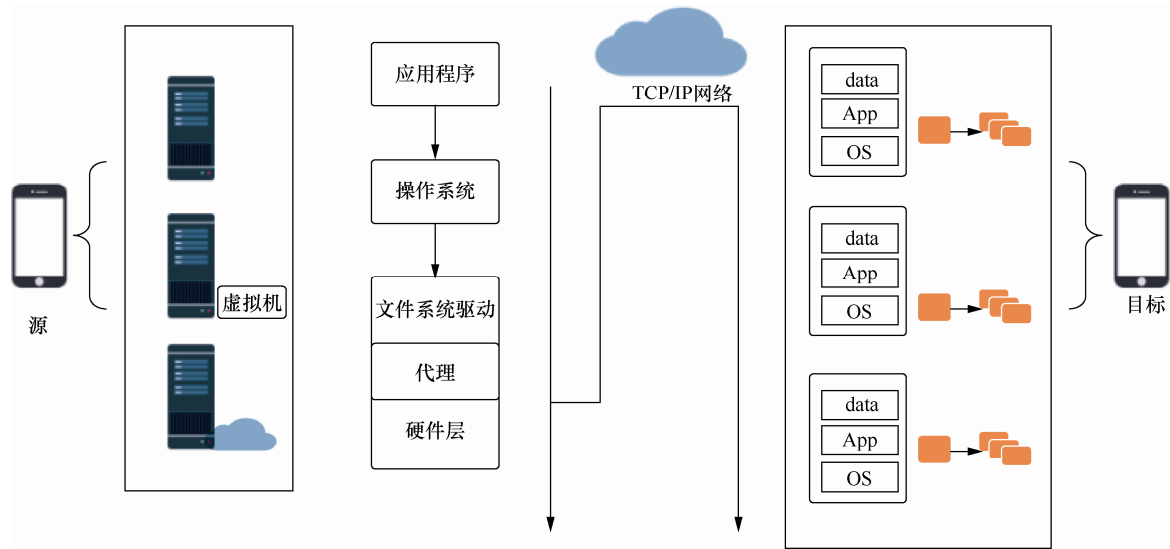


图 6 基于块级别在线业务迁移

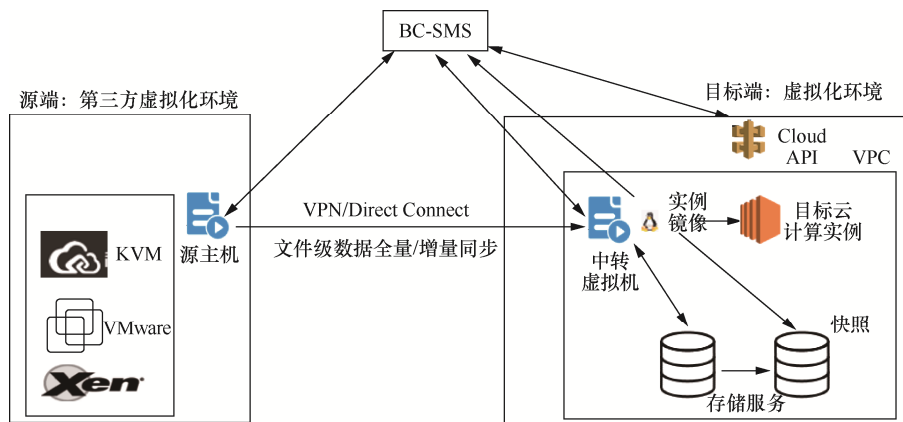


图 7 基于文件级别在线业务迁移

2) SMS-agent 首先调用操作系统(OS, operating system) 接口, 获取虚拟机的完整信息。通过调用 OpenStack API 创建中转虚拟机。在调用此接口时指定中转镜像, 中转虚拟机创建完成后, 中转虚拟机的中转镜像服务自动启动。

3) SMS-agent 检查源端和中转虚拟机网络联通情况, 数据的同步过程必须网络可达。

4) 中转服务, 挂载磁盘并初始化磁盘。

5) 利用 rsync 同步数据。

4.4.2 现网割接阶段

1) 停机, 做最后一次增量同步。

2) 基于生成的系统卷创建快照。

3) 利用快照生成镜像。

4) 利用镜像创建目标实例系统卷, 并挂载数据盘, 形成完整实例。

4.4.3 业务启动和测试

该方案特点包括: 源端安装代理, 需要侵入系统; 文件级别数据同步, 支持流量控制和磁盘扩容; 系统不停机, 业务分钟级停机。

5 业务迁移实施流程和方法

生产环境的迁移必须保证迁移不会对现网业务产生大的影响, 通过一套完善的流程和方法来保证迁移的成功率是非常必要的。在各个厂商迁移实践过程中, 形成了各自特有的流程和方法, 一部分厂商关注迁移预测试, 预测试中关注迁移过程中的性能指标和兼容性指标收集; 另一部分厂商更多地

注重迁移调研, 系统化分析待迁移的业务系统, 根据调研情况指导迁移方案。虽然迁移流程各有特点, 但是归纳起来主要包括 4 个阶段, 分别为调研与咨询、方案制定、迁移实施和联调切换, 迁移实施流程如图 8 所示。

5.1 调研与咨询

迁移前期需要做需求调研, 针对业务系统进行评估分析准备工作, 包括评估分析范围的初步确定、确认评估分析方法并准备相关调研所需材料。采用现网环境梳理、现场实际环境评估及确认等对待迁移业务系统进行评估和分析, 为迁移工作提供有力支撑。

业务迁移需要提前确认的内容主要包括物理机型号、操作系统类型、虚拟类型、集群情况、内存大小、内存平均率、CPU 数量、CPU 使用率、磁盘个数、实际数据/数据总大小和数据增长规律等^[34]。在基础调研后, 需要做基础架构的调研和评估, 在物理基础架构信息收集和评估中, 计算节点能力、存储容量和网络信息、相关的利用率和性能是重要的评估内容。在物理基础架构的评估中, 应完成如下内容的评估。

1) 在基础架构的 CPU 评估中, 收集 CPU 的型号、主频、内核数和颗数, 应评估 CPU 的使用率。

2) 在基础架构的内存评估中, 收集内存的容量和使用率。

3) 在基础架构的磁盘评估中, 收集磁盘的数量、RAID (redundant arrays of independent disk) 方

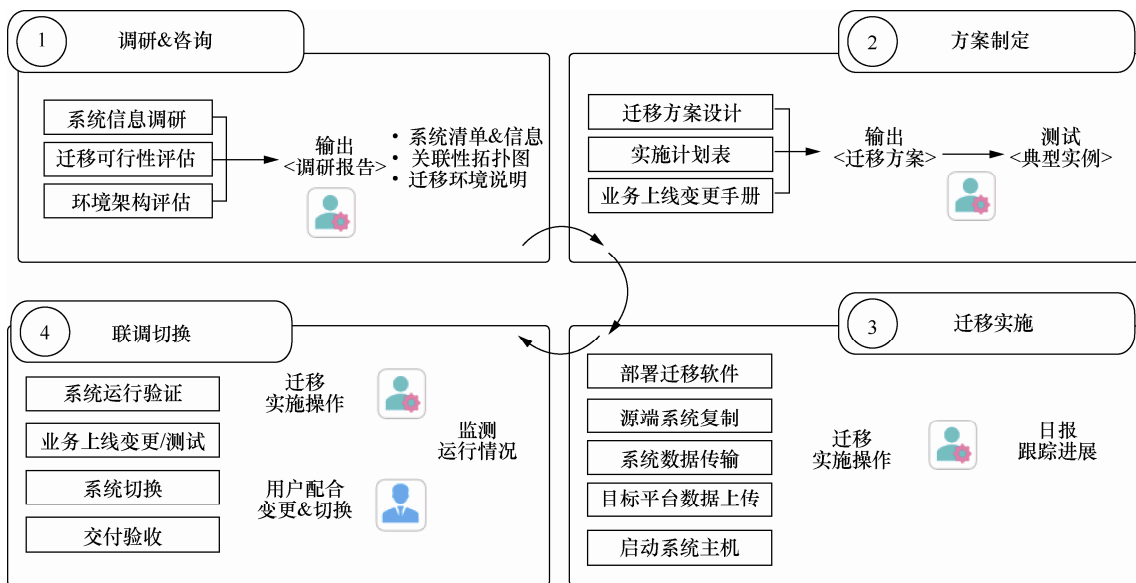


图 8 迁移实施流程

式、文件系统类型、文件系统总容量和磁盘 I/O 性能等。

4) 在基础架构的网络评估中,收集服务器的网卡容量、数量及网络性能,网络交换机的型号、网口数、数量以及基础架构的网络拓扑图等。

基础架构调研阶段完成后,需要进一步做应用系统调研与评估,在应用系统层面需针对不同维度进行评估。

1) 应用系统维度:应用系统评估应包括操作系统类别、版本号(与内核号)、补丁版本、应用软件种类和版本等。

2) 业务系统维度:完整的业务系统服务通常包括多个应用系统之间的关联关系,通过业务系统间的逻辑架构分析,从而判断各个应用系统间的依赖关系和逻辑关系。业务系统的逻辑架构可以为确定迁移依赖关系、迁移顺序和迁移后存储等提供参考。

5.2 方案制定

在迁移方案中,针对云迁移进行详细方案设计,资源确认、迁移前后的各项资源描述、迁移工作顺序、迁移测试及实施计划表。针对迁移场景设计、资源使用、迁移顺序、测试和时间安排做好规划设计,为迁移后的应用系统做好支撑服务^[35-36]。

在迁移方案制定时,依据源迁移对象、目标场所等因素设计迁移阶段的相关场景。

1) 测试环境:主要完成迁移过程中应用系统功能、性能等方面的压力测试以及应用系统上线之前的模拟验证。

2) 正式环境:在迁移后的功能、性能压力测试与模拟确认无误后,即可将应用系统归至正式环境提供服务。

根据应用系统间的依赖关系及应用系统本身的特性,设计整个系统的迁移顺序。源应用系统可分为独立应用系统、被依赖应用系统、依赖应用系统和复杂应用系统。

独立应用系统:该主机上只有一个应用系统,并且与其他应用系统没有任何依赖关系。被依赖应用系统:该应用系统被其他应用系统所依赖,如消息队列系统等。依赖应用系统:该应用系统依赖于其他应用系统。复杂应用系统:该主机上有多个应用系统,这些应用系统间可能有依赖关系,也可能没有依赖关系。

在迁移实施时,按照由难到易、由复杂到简单的顺序,能更好地完成所有迁移工作。具体遵循以下迁移顺序:1) 被依赖的应用系统优先,数据库等先进行迁移;2) 依赖应用系统;3) 独立应用系统;4) 复杂应用系统。

5.3 迁移实施

迁移实施主要包括迁移环境准备和迁移执行。迁移环境准备是迁移前最重要的工作,包括人员、网络环境、迁移技术手段、迁移工具等内容的准备。应用系统迁移前,相关人员应准备就绪,包括业务单位信息化负责人、云平台建设运维服务方、迁移服务商等;确认云平台具有足够的 CPU、内存、存储和网络资源,以满足被迁移系统的需求。在迁移前,对重要的数据和应用系统进行备份,以防止迁移过程中发生意外情况,必要的系统于迁移前做好压力测试及操作系统重启工作。在迁移执行阶段,需遵守已制定的迁移方案并且严格执行迁移流程。

5.4 联调切换

应用系统在联调切换前需进行充分测试与验证,为业务上线做好准备工作,测试方案包括于迁移方案中。测试迁移后的应用系统是否具有与原系统相同的功能,对应用系统进行功能性测试、性能测试、稳定性测试,并对有问题的地方进行优化调整,最后进行应用系统验证,保证服务能够顺利上线。

应用系统切换包括如下 3 个步骤。

1) 原应用系统停用

以断开对外网络的方式中止源应用系统对外服务,停止数据访问,保持数据的完整性。若迁移后的虚拟机无法正常使用,可在最短时间内启用源应用系统。

2) 最终的数据同步

将源应用系统磁盘内的数据进行最终的增量数据同步,以维持源端与目标端数据的一致性。

3) 新系统服务上线

在迁移工具中触发业务切换,将迁移后的应用系统在目标云平台启动并开始对外提供服务。

由于应用系统联调切换后,有可能导致少数迁移主机无法顺利提供服务。针对此类突发情况,需要在联调切换前拟定应变方案。各类源系统在迁移之前需要进行至少一次备份,备份数据需要包含操作系统、应用以及数据等,以保证数据完整可用。

在迁移过程中，由于其他原因导致迁移失败则可利用尚未移除的源主机恢复服务或通过备份系统进行有效恢复，保障业务的连续性。

当目标云平台上的应用系统上线后，需要持续对迁移后的业务系统运作进行监控观察。在观察期内，当遇到运行不稳定的服务时要及时进行问题排除及优化；若问题无法排除，则需启动回退机制，将应用系统回退至源平台/源主机运行提供服务。

6 业务迁移实验与讨论

根据上述迁移原理和迁移流程，在我国移动网络环境下进行业务迁移测试，本次测试围绕基于系统的业务迁移方法展开。其他非基于系统的业务迁移如应用重新部署、应用的基于特定平台深度改造、数据库的迁移等，这些方式都和具体的应用强相关，需要结合具体的应用进行讨论，本文不做具体论述。另外，由于离线迁移在业务的迁移过程中需要关闭源服务器且关停服务，导致对用户的影响较大，生产环境中一般不优先采用，因此，业务迁移实验不将其纳入对比测试。迁移测试主要对基于平台功能的迁移、基于块级别在线业务迁移、基于文件级别在线业务迁移 3 种在线迁移方案进行对比测试，给出各个迁移方法的特点和适合场景。该 3 种方案都是基于系统的业务迁移，具体应用的部署方式（单机或集群）和类型对研究迁移方法的特点和适合场景无影响。为了广泛获取迁移方式的特点，分别采用 Windows Server2012 R2、CentOS7.2 和 SUSE12 等 3 款主流操作系统进行对比测试。

迁移测试环境的源端为 VMware 平台，目标平台为 OpenStack。在 VMware 环境中安装 6 台测试虚拟机，分别为 CRM01、CRM02、CRM03、CRM04、CRM05 和 CRM06，且每台虚拟机都部署客户资源管理（CRM, customer relationship management）系统应用。迁移测试业务系统配置场景如表 3 所示，为了尽可能模拟现网环境的迁移并减少对现网业务的影响，整体迁移在限速情况下进行。由于基于平台功能在线迁移方案不支持对各个虚拟机限速，因此，将整体限速设为 60 MB/s。对于基于块级别在线业务迁移方案和基于文件级别在线业务迁移方案，每台虚拟机限速为 10 MB/s，整体限速为 60 MB/s。

表 3 迁移测试业务系统配置场景

业务系统	虚拟机名称	虚拟机地址
CRM 系统	CRM01	192.168.1.1
	CRM02	192.168.1.2
	CRM03	192.168.1.3
	CRM04	192.168.1.4
	CRM05	192.168.1.5
	CRM06	192.168.1.6

为了保证迁移对比的效果，3 种迁移方案关于待迁移虚拟机数量、迁移平台、虚拟化系统、硬件配置、磁盘以及实际数据量的配置均保持一致，是同一批虚拟机。其中，实际数据量的一致性保障是通过 VMware 的快照恢复功能完成的，即在迁移前做虚拟机的快照，在迁移结束后，用迁移前的快照进行恢复。

第一次测试基于 Windows Server2012 R2 系统进行，第二次测试基于 CentOS7.2 进行，第三次测试基于 SUSE12 进行。对每一次测试，按照如下迁移测试操作步骤进行操作。

步骤 1 利用 VMware 的功能，先对每台虚拟机做快照，从而保证 3 种迁移方案的初始状态一致。

步骤 2 进行基于平台功能的迁移测试。首先安装迁移工具，接着进行限速配置，然后在 6 台虚拟机上进行迁移。全量迁移完成后停服，然后进行增量迁移。最后，进行目标平台虚拟机的启动和应用的启动。

步骤 3 通过步骤 1 创建的快照恢复 6 台虚拟机到初始状态，进行基于块级别的迁移测试。在每台虚拟机中安装代理，然后触发迁移。全量迁移完成后停服，然后进行增量迁移。最后，启动目标平台虚拟机和应用。

步骤 4 通过步骤 1 中创建的快照，恢复 6 台虚拟机到初始状态，进行文件级别的迁移测试。全量迁移完成后停服，然后进行增量迁移^[1]。最后，启动目标平台虚拟机和应用。

图 9、图 10 和图 11 分别为 Windows、CentOS7.2 和 SUSE12 系统下业务迁移方案停服时长测试对比，其中，纵坐标为时间/min。可以看出，在实际的迁移测试中，操作系统对这些方案基本没有影响，只有 Windows 系统下停服时长稍长，主要原因是人工停服方式不一样导致的业务停服时长误差。

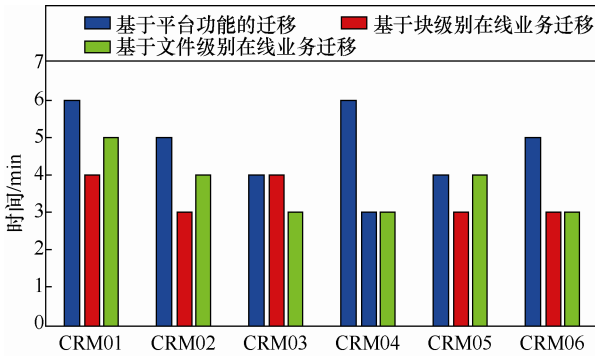


图9 Windows 系统下业务迁移方案停机时长测试对比

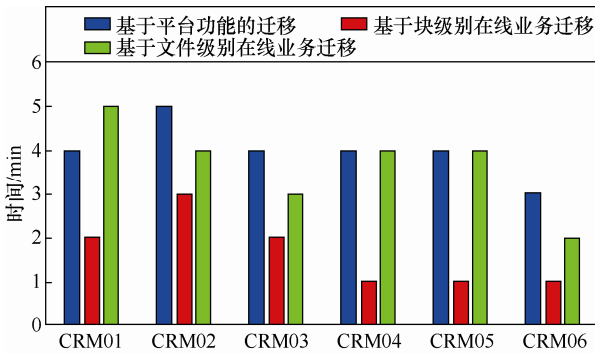


图10 CentOS7.2 系统下业务迁移方案停机时长测试对比

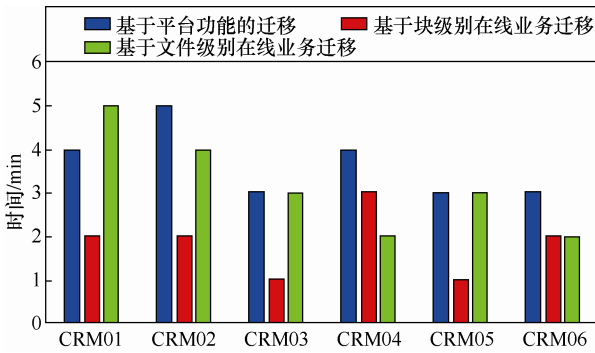


图11 SUSE12 系统下业务迁移方案停机时长测试对比

在各个系统下, 3 种方案的停机时长存在差异, 其中, 基于平台功能的迁移方案的各台虚拟机停机时长均超过 3 min, 需要 3~6 min 完成; 基于块级别在线业务迁移方案的虚拟机停机时长最短, 实测为 1~4 min; 基于文件级别在线业务迁移方案的虚拟机停机时间是 2~5 min。

对比 3 种迁移同步方案, 各迁移方案的优缺点及适用场景如表 4 所示。

基于平台功能的迁移方案不支持对各台虚拟机的迁移速率进行限速, 只能对 6 台虚拟机迁移整体限速, 限速为 60 MB/s。在基于平台的迁移过程中, 当其他虚拟机迁移完成后, 剩余虚拟机的迁移速度就会比 10 MB/s 大。从侧面可以看出, 基于平台功能的迁移方案限速比其他两种方案的精确度差。

相较于基于文件级别在线业务迁移方案, 基于块级别在线业务迁移方案的各台虚拟机的停机时长均短约 1 min 或以上, 主要原因是基于块级别在线业务迁移采用顺序读写磁盘, 比文件级别的方案随机读写速度快, 所以增量数据的同步时间较短。此外, 在业务停机后, 基于块级别在线业务迁移方案只需把改变的扇区同步到目标端即可完成增量数据的同步。而基于平台功能的迁移需要先将增量的快照同步, 然后将增量快照和之前的全量快照合并, 才能启动虚拟机, 而快照的合并需要时间。基于文件级别在线业务迁移方案需要先对比源端和目标端的文件差异, 再将差异文件进行增量同步, 这就需要额外的处理时间。

7 结束语

本文首先对业界的主流迁移方案进行原理分

表 4 各迁移方案的优缺点及适用场景

技术方案	方案优势	非适用场景
基于平台功能的迁移	不用侵入系统, 避免用户信息的泄露, 更安全可靠	① 不适合实施精确的流量控制, 流量控制的粒度是每个批次, 不能到达每台虚拟机 ② 该功能严重依赖平台的负载, 如在 VMware vcenter 忙时, 则快照功能处理较慢 ③ 只支持特定平台
基于块级别在线业务迁移	① 迁移速率较快, 停机时间相对较短 ② 流量控制可以到每台虚拟机的粒度	① 需要侵入源服务器 ② 不支持磁盘缩容
基于文件级别在线业务迁移	① 流量控制可以到每台虚拟机的粒度 ② 支持磁盘缩容, 适合源端为物理机的场景	需要侵入源服务器

析, 然后就迁移的流程和方法进行论述。通过业务系统的实测, 针对在线迁移方案的效果进行性能对比, 获得不同场景下各迁移方案的应用特点和优势, 从而指导业务迁移的生产实践。政企客户和第三方开发者可以根据不同的环境、网络条件以及各自平台的特点, 选择适用于自身业务系统的迁移方式, 从而降低迁移过程中的风险和损耗, 达到经济效益和安全保障最大化的目的。

参考文献:

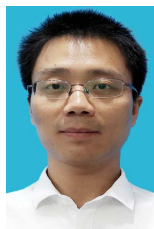
- [1] 工业和信息化部电信研究院. 云计算白皮书[S]. 2012. Telecommunication Research Institute of the Ministry of Industry and Information Technology. Cloud computing white paper[S]. 2012.
- [2] 中国信息通信研究院. 云计算发展白皮书[S]. 2019. China Academy of Information and Communications Technology. White paper on cloud computing development[S]. 2019.
- [3] WANG K. Migration strategy of cloud collaborative computing for delay-sensitive industrial IoT applications in the context of intelligent manufacturing[J]. *Computer Communications*, 2020(150): 413-420.
- [4] PATEL Y S, PAGE A, NAGDEV M, et al. On demand clock synchronization for live VM migration in distributed cloud data centers[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2020(138): 15-31.
- [5] 宋富洪, 邢焕来, 潘炜. 一种面向移动云计算的多目标任务卸载算法[J]. *物联网学报*, 2019, 3(3): 41-49. SONG F H, XING H L, PAN W. Multi-objective task offloading algorithm for mobile cloud computing[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(3): 41-49.
- [6] JOSE C, FRANCISCO D, ERNESTO P. Live migration of trans-cloud applications[J]. *Computer Standards and Interfaces*, 2020(69): 1-14.
- [7] LOYD W J, PALLICKARA S, DAVID O, et al. Migration of multi-tier applications to infrastructure-as-a-service clouds: an investigation using kernel based virtual machines[C]//IEEE/ACM International Conference on Grid Computing. IEEE, 2011: 137-144.
- [8] LOYD W, PALLICKARA S, DAVID O, et al. Performance implications of multi-tier application deployments on infrastructure-as-a-service clouds: towards performance modeling[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(5): 1254-1264.
- [9] REN S Y, HE L G, ZHU H Z, et al. Developing power-aware scheduling mechanisms for computing systems virtualized by Xen[J]. *Concurrency Computation*, 2017, 29(3).
- [10] MICHAEL C. VMware opens, reinforces hybrid-cloud migration software[J]. *Network World*, 2019.
- [11] CHAE M, LEE H, LEE K. A performance comparison of Linux containers and virtual machines using docker and KVM[J]. *Cluster Computing*, 2019, (22): 1765-1775.
- [12] DIALLO M H, AUGUST M, HALLMAN R, et al. Automigrate: a framework for developing intelligent, self-managing cloud services with maximum availability[J]. *Cluster Computing*, 2017, 20(3): 1995-2012.
- [13] WANG W Y, JIANG Y C, WU W W. Multiagent-based resource allocation for energy minimization in cloud computing systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(2): 205-220.
- [14] BELLO M. Cloud-based conversational agents for user acquisition and engagement[C]//International Conference on Cloud Computing and Services Science. IEEE, 2019: 528-534.
- [15] SADOOGHI I, HERNANDEZ M J, LI T L, et al. Understanding the performance and potential of cloud computing for scientific applications[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2017, 5(2): 358-371.
- [16] CARVER B, ESPOSITO T, LYKE J. Cloud-based computation and networking for space[C]//International Society for Optical Engineering (SPIE). 2018: 1-16.
- [17] 富宇, 卢士达, 王宝来, 等. 基于异构平台的开源 VIRT-V2V 虚拟化迁移自动化实现的研究[J]. *电力信息与通信技术*, 2019, 17(6): 63-68. FU Y, LU S D, WANG B L, et al. Research on implementation of open source VIRT-V2V virtualization migration automation based on heterogeneous platform[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2019, 17(6): 63-68.
- [18] LI B G, SHU J W, ZHENG W M. Design and implementation of a storage virtualization system based on SCSI target simulator in SAN[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2005, 10(1): 122-127.
- [19] 刘禹燕, 牛保宁. 半虚拟化框架 Virtio 的网络请求性能优化[J]. *小型微型计算机系统*, 2018, 1(1): 105-110. LIU Y Y, NIU B N. Optimizing network performance of para-virtualization virtio framework[J]. *Journal of Chinese Mini-Micro Computer Systems*, 2018, 1(1): 105-110.
- [20] 陈睦, 黄黎明, 李先锋. 云计算中虚拟机磁盘迁移时机优化策略[J]. *计算机工程与设计*, 2014, 2(2): 525-530. CHEN M, HUANG L M, LI X F. Disk migration timing optimization mechanism in cloud computing[J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 2(2): 525-530.
- [21] HE S, HU C M, SHI B, et al. Optimizing virtual machine live migration without shared storage in hybrid clouds[C]//IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, 14th IEEE International Conference on Smart City and 2nd IEEE International Conference on Data Science and Systems (HPCC/Smart-City/DSS). IEEE, 2016: 921-928.
- [22] KARGATZIS D, SOTIRIADIS S, PETRAKIS E G M. Virtual machine migration in heterogeneous clouds: from OpenStack to VM-Ware[C]//38th IEEE Sarnoff Symposium. IEEE, 2017: 1-6.
- [23] 陈雯倩. 基于云平台的虚拟机快照存储备份技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018. CHEN W Q. Research on virtual machine snapshot storage and backup technology based on cloud platform[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [24] 邵曦煜, 李京, 周志强. 一种 Ceph 块设备跨集群迁移算法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2018, 48(9): 748-754. SHAO X Y, LI J, ZHOU Z Q. Migration algorithm for Ceph block device cross clusters[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2018, 48(9): 748-754.
- [25] 周林. OpenStack 和 Ceph 结合的云存储设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018. ZHOU L. Design and implementation of cloud storage based on OpenStack and Ceph[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [26] 武义涵, 黄翌, 张颖, 等. 一种基于模型的云计算容错机制开发方法[J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(1): 138-154. WU Y H, HUANG G, ZHANG Y, et al. A model-based fault tolerance mechanism development approach for cloud computing[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(1): 138-154.

- [27] AWASTHI A, GUPTA R. Multiple hypervisor based OpenStack cloud and VM migration[C]//International Conference-Cloud System and Big Data Engineering(Confluence). IEEE, 2016: 130-134.
- [28] LUO Y W, ZHANG B B, WANG X L, et al. Live and incremental whole-system migration of virtual machines using block-bitmap[C]//IEEE International Conference on Cluster Computing(ICCC). IEEE, 2008: 99-106.
- [29] HAO W, THURASINGHAM B M, YEN I L. Dynamic service and data migration in the clouds[C]//International Computer Software and Applications Conference. 2009(2): 134-139.
- [30] AMORETTI M, LAGHI M C, TASSONI F, et al. Service migration within the cloud: code mobility in SP2A[C]//International Conference on High Performance Computing and Simulation(HPCS). IEEE, 2010: 196-202.
- [31] SIM K M. Agent-based cloud computing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2012, 5(4): 564-577.
- [32] JAHANI A, DERAKHSHAN F, KHANLI L M. Arank: a multi-agent based approach for ranking of cloud computing services[J]. Scalable Computing, 2017, 18(2): 105-116.
- [33] FERNANDO D L P, SARA R G, PABLO C, et al. Survey of agent-based cloud computing applications[C]//Future Generation Computer Systems. 2019(100): 223-236.
- [34] 胡荣辉. 基于云计算平台的虚拟机部署及迁移策略研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
HU R H. Research on virtual machine deployment and migration strategy based on cloud computing platform[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [35] 郭静. 面向私有云的业务迁移部署方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(2): 191-198.
GUO J. Research on system migration and deployment method for private cloud[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(2): 191-198.
- [36] 黄秋兰, 李海波, 石京燕, 等. 基于Openstack的高能物理虚拟计算集群系统及应用[J]. 计算机科学, 2017, 44(10): 59-63.
HUANG Q L, LI H B, SHI J Y, et al. Openstack-based virtualized computing cluster and application for high energy physics[J]. Computer Science, 2017, 44(10): 59-63.

[作者简介]



魏峰(1989-), 男, 山西汾阳人, 中移(苏州)软件技术有限公司研发工程师, 主要研究方向为 OpenStack、迁移上云的设计和研发。



丁飞(1981-), 男, 江苏泰兴人, 博士, 南京邮电大学物联网学院副教授, 主要研究方向为物联网与信息系统、异构网络融合技术、信息处理与大数据。



焦鹏举(1989-), 男, 河南汝州人, 中移(苏州)软件技术有限公司研发工程师, 主要研究方向为 OpenStack、弹性计算、虚拟化、分布式存储的设计和开发。



李杨(1985-), 女, 内蒙古通辽人, 中移(苏州)软件技术有限公司项目经理、高级信息系统项目管理师、中级通信工程师, 主要研究方向为云平台建设和项目管理。



陈焱山(1988-), 男, 安徽太湖人, 中移(苏州)软件技术有限公司研发工程师, 主要研究方向为软件定义统一存储系统和数据备份开发。



张登银(1964-), 男, 江苏靖江人, 博士, 南京邮电大学物联网学院院长、研究员, 主要研究方向为信息网络、智能信号处理、物联网与无线通信。