























拟机全网实时迁移.文献[46,47]进一步优化了 MIP6 模型,舍弃本地代理组件,提出了 MAT 架构,保证节点间通过最佳路由通信.如图 8 所示,每个虚拟机都会有永久地址(HoA)和移动地址(MoA)两个 IP 地址,其中,永久地址专有且固定,是与外界通信的标识.MoA 则随虚拟机的位置变动而改变,两地址间的映射由 IP 地址映射服务器(IMS)组件管理.这样就保证了虚拟机面向用户网络配置的一致性,同时,由于 HoA 固定不变,通信节点间可以通过最优路由进行访问,保证了通信的高效性.

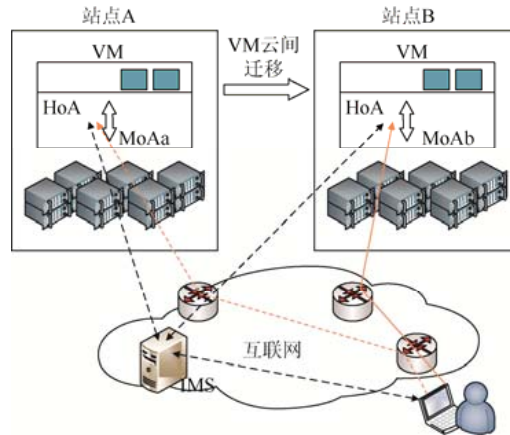


Fig.8 The architecture of MAT<sup>[47]</sup>

图 8 MAT 架构<sup>[47]</sup>

### 2.2.2 网络资源优化

分布式云数据中心之间的数据交互,大多数情况下都是通过广域网来实现的.相比于数据中心内部的可用带宽,数据中心间的网络带宽是非常匮乏的,存在很高的超额订购现象.并且,由于广域网链路距离非常长,网络环境多样性非常大,整个广域网的丢包和出错概率都相对较高,一般链路利用效率只有 30%~40%左右<sup>[19]</sup>.为了降低虚拟机迁移过程中的网络资源消耗,Celesti 等人<sup>[48]</sup>提出一种组合镜像克隆(CIC)方式,将虚拟机从一个整体拆分开,视为由若干“可组合模块”和“用户数据模块”组成.目的站点只需要从源站点复制其缺少的“可组合模块”,结合内存及状态信息即可完成虚拟机迁移,这样大大减少了网络传输数据量.理想情况下,站点间只需传输“用户数据模块”即可.

另外,有研究表明,流量花费往往占到云服务提供商总的操作开销的 15%<sup>[49]</sup>.因此,在去除了数据中心间不必要的资源传输后,如何对 Inter-DCN 网络中带宽进行合理分配也是学术界的一个研究点,其主要解决的问题是,在 Inter-DCN 网络中如何协调具有不同特性的流量进行高效传输.对于一个云站点,其传输带宽要么用来响应用户的实时请求,要么用来实现与远程数据中心的 server-to-server 的数据传输.因此,根据时延敏感性,Inter-DCN 流量可以划分为 3 类:(1) 交互式流量,其对时延十分敏感;(2) 长传输流量,需要传输在限制的时间内完成;(3) 背景流量,没有严格的时间限制<sup>[19]</sup>.Chen 等人<sup>[50]</sup>发现,在 Yahoo!公司的 Inter-DCN 流量中背景流量占主导地位,同时谷歌公司也部署了大规模的 Inter-DCN 备份服务<sup>[51]</sup>,这类服务的特点是实时性要求较低.因此,利用闲置的带宽资源来传输背景流量(运行备份应用),就能够有效提高云服务提供商已购买带宽的利用率.

在分布式云系统中,云站点中应用的需求变化呈现出很强的昼夜模式,但是不同的云站点位于不同的地区,其往往具有一定的时差,这就意味着云站点 A 的峰谷时间可能与云站点 B 的峰谷时间不吻合,因此,如何高效地利用时间区间不重合的闲置带宽来传输数据,是一个亟需解决的问题.Laoutaris 等人<sup>[52]</sup>提出了 NetStitcher 系统,将批数据分块,应用存储转发(store-and-forward)算法,设置转发存储节点来对数据进行临时存储和重新路由,由此实现了对不同地区和时间的闲置带宽的有效结合.基于 NetStitcher 的存储转发思路,Jetway 系统<sup>[53]</sup>设计了应用于 Inter-DCN 网络中视频流量的路由策略.同时,相较于 NetStitcher 考虑的单一文件的传输,Jetway 在问题建模时,考虑了多视频流的共同存在现象,这更加符合现实要求.文献[54]则基于 NetStitcher,在进行调度时,考虑了

传输流的优先级,并赋予数据流严格的截止时间.Zhang 等人<sup>[55]</sup>则设计了基于截止时间的网络抽象,为租户提供确定其传输截止时间的接口,并设计了 Amoeba 系统来保证服务提供商实现截止时间内的有效调度.更加全面地,BwE<sup>[56]</sup>通过设计一个全局的层次化的系统来实现对不同优先级的流量控制转发策略.最终,该系统应用于谷歌公司的 B4 系统中.表 3 给出各个带宽分配策略的对比情况.

Table 3 Comparison of bandwidth allocation strategy

表 3 带宽分配策略对比

文献	系统	应用/场景	流量特性	方法论
[52]	NetStitcher	备份服务	背景流量	存储转发(store-and-forward)算法
[53]	Jetway	视频流量	背景流量	对视频流进行切分并路由
[54]	-	具有截止时间的数据流	长传输流量	结合带宽预留、动态调整、未来需求友好的动态调度算法
[55]	Amoeba	具有截止时间的数据流	长传输流量	时空分配算法
[56]	BwE	不同优先级的流量调度	所有流量	扩展现有的最大-最小方法,实现多路径路由和分层公平性

### 3 分布式云安全

一套完整的云安全系统必须是针对从硬件资源到应用软件的全方位综合方案,其中,包括硬件安全、虚拟机管理安全、客户操作系统安全、应用安全以及网络安全.随着跨云服务和多云合作相关概念和构架的出现,探究多云环境下的云安全问题也逐步成为研究热点之一.部分学者认为<sup>[57]</sup>,多云环境一定情况下提高了数据的安全性.通过从应用的系统层面、逻辑层面以及用户数据层面进行分块,将其存储在分布式云系统中,能够比较有效地避免恶意的数据篡改、泄露等事件的发生.Coady 等人<sup>[21]</sup>指出,分布式云系统通过将数据存储在本地产或者近邻的地方,从理论上讲,能够提高云计算环境下数据的隐私性.然而,多云合作提供的数据冗余服务在提升了服务可用性的同时,用户被迫扩大了自己的信任域,这就使得对访问权限控制和数据存储过程的安全性提出了更高要求.其中,分布式数据存储的安全加密算法在文献[58]中已给出充分研究,本文主要对云间访问控制策略展开介绍.一般访问控制主要由认证和授权构成,分布式云系统不仅考虑用户访问多云系统的安全模型,还要考虑云站点和云站点之间的信任模型及认证机制.因此,本节主要从用户信任模型、云间信任模型两方面展开介绍.

#### 3.1 用户信任模型

在云计算环境中,数据托管在云服务器中,导致数据拥有者不能对数据和对其的访问进行直接控制,因此对不同安全等级的数据分别存储是一个比较直观的解决方案.Cascella 等人<sup>[59]</sup>提出了用户信任关系模型,并设计了一种基于隐私的以用户为中心的 personal cloud 模型.在这个模型中,用户能够直接控制其数据的存储地方,而不需要将其敏感数据的管理权力派发给公有云服务提供商.本质上,该方案通过强化本地性的方式确保了隐私性.基于同样的思路,Oliver 等人在欧盟的(scalable and secure infrastructures for cloud operations,简称 SSICLOPS)项目中允许用户指定哪些数据在本地进行存储和处理,以降低数据泄露的风险.

扩大用户的信任域,另一种思路则是通过强化认证、密钥或者访问控制的方式,强化数据连接与存储的安全来保障隐私.在文献[60]中,作者假定系统由数据拥有者、数据消费者以及多个云服务提供商构成.将每个数据文件关联一组属性,结合基于属性的加密技术(KP-ABE)、代理重加密(PRE)和惰性重加密技术,实现了基于数据属性定义的访问政策.同时,允许数据拥有者通过更细粒度的数据访问控制,在不暴露底层数据内容的情况下,将计算任务派发给不受信任的云服务提供商,由此实现了安全的、可扩展的、细粒度的数据访问控制机制.文献[60]仅提供了对存储数据本身进行机密性保护的机制,并未涉及对数据访问信息或数据访问模式信息的保护.在文献[61]中,作者采用 B+ 树的结构,并应用 cover、cache 和 shuffle 技术,设计了新的数据结构——洗牌索引(shuffle index),其假定数据被存储在叶子之间没有任何连接的 B+ 树中,应用节点级别的加密技术来保证实际数据不被云存储服务器获取到.客户端(数据拥有者)不仅能够将实际请求隐藏在 cover 请求和缓存节点中,也能够将存储在服务器中的数据块进行洗牌打乱.由此包括服务器在内的任何观察者都不能重建数据块和访问数据之间的关联,确保了数据的机密性以及数据查询操作的安全性,同时能够有效保护单一或连续的访问操作.

另外,作者还验证了洗牌索引机制能够在可容忍的通信和计算开销下实现在广域网即分布式云系统中的数据访问.

### 3.2 云间信任模型

由第 1 节可知,分布式云根据云间的互操作性和访问权限,可以分为松耦合、部分耦合以及紧耦合 3 类.对于紧耦合的多云系统,其由一个 CSP 控制,云站点之间基本是同构的,因此云站点间一般不需要严格的信任模型.而对于松耦合和部分耦合的系统,不同的云站点往往隶属于不同的云服务提供商,异构系统之间的互操作会引入一些安全问题.因此,学术界在云间的信任模型方面进行了一定的研究.目前的解决方案按照是否引入第三方可信机构<sup>[62]</sup>,分为:(1) SSO(single-sign on)认证,云站点 A 一旦获取到对云站点 B 的访问权限后,再次访问也不需要再进行身份认证.(2) 数字认证和第三方,当云站点 A 要访问云站点 B 时,需要利用第三方提供的数据证书.

文献[12]基于 Intercloud 模型提出了基于公钥基础设施 PKI(public key infrastructure)的信任模型.PKI 信任模型依赖于几个 leader node 来保证整个系统的安全,同时,leader node 的认证有效性由认证中心 CA(certificate authority)设定.其中,证书不仅能够认证云站点,也可以认证云所提供的资源,因此,这需要 CA 根据云中动态的资源和负载生成相应的证书.Intercloud Root Systems 作为信任权威(trust authority)提供静态的 PKI CA,Intercloud Exchange 作为 CA 中介,提供实时的具有有限生命周期的信任证书.在该模型中,作者利用具有时间限制的 Trust Index 来表示 CSP 的信任级别(40%、50%,等等),并将不同的云站点划分成几个信任域,在同一信任域的云站点间有较高的信任等级.其认证和访问管理流程如图 9 所示.在这样一个典型的联邦认证模型中,云服务商之间建立安全通信,首先需要向对应的信任提供商请求一个信任令牌.信任提供商返回给其信任服务的加密校验令牌 P1 以及加密的请求令牌 T1,以完成后续的操作.该方案是数字认证和第三方解决方案的应用,其利用统一的规则为每个云站点分配令牌.文献[62]提出的信任与认证模型则属于 SSO 认证模型,该模型也划分了信任域,并且每个信任域由 IdP(identity provider)管理.其认证管理流程与上一个模型的差异在于,当云站点获取到某个 IdP 的信任之后,即可访问该 IdP 管理域的所有云站点,同时,该模型中也允许每个云站点使用其独立的认证机制.两个方案对比来看,文献[12]的模型中每个云站点虽然不能利用其特有的认证机制,但其考虑了分布式云系统中资源的动态性,且强调其 CA 的生命周期,具有更强的保密机制,更适用于实际场景.

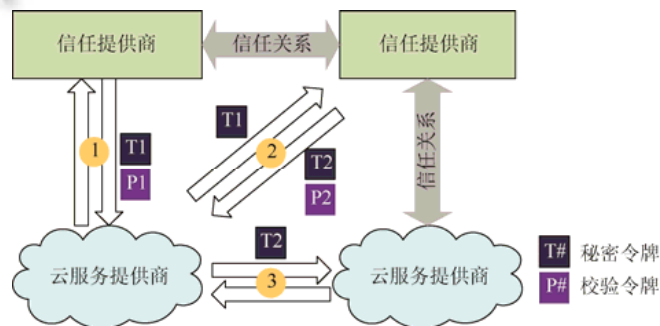


Fig.9 Intercloud identity federation model<sup>[12]</sup>

图 9 Intercloud 认证联邦模型<sup>[12]</sup>

## 4 发展趋势和展望

相对于目前拥有大量计算资源的集中式单一数据中心,分布式云计算的提出,主要是为了利用软件将分散在不同地理位置的数据中心的计算/存储/网络资源整合起来,通过实现数据本地化服务,为用户提供较近的计算和存储资源,有效地降低通信开销,提高用户体验和系统稳定性.本文分别从分布式云架构、资源调度与性能优化策略、分布式云安全这 3 个方面进行介绍.通过分析可以看出,现有分布式云系统中部分研究还处于初级阶段,主要原因在于各个云服务提供商出于利益等方面的考虑并未实现云间联合,更多的是云服务提供商自己

多数据中心基础设施的搭建与实现以及混合架构模型的实现.根据本文的分析,未来可以更多地关注以下几点.

1.分布式云架构模型中可进一步关注的研究点有:

(1) 对等架构各云服务提供商通过签署协议,聚合各方云资源,形成庞大的云资源.该架构是最契合分布式云提出思路的模型,但目前成果较少.云服务设计过程中未充分考虑互操作性问题,而学术界多数研究尚处于初级阶段,未真正落地.在这一方面,通过定义云服务标准接口或设置代理实现云间互操作性的问题亟待解决.

(2) 云站点间的联合对站间网络方案提出了很大挑战,网络架构设计、网络管理、带宽资源分配、一致性更新等是在数据中心网络中备受关注的研究方向,其研究成果是否可以得到沿用,而又将有怎样的改进,值得进一步关注.

2.分布式云中资源分配策略一直备受关注,在资源选择和优化算法方面有较多的研究成果.其中存在的问题主要有:

(1) 托管在云中的应用千差万别,其中有 Web 应用、视频应用、存储应用等,同时,这些应用的服务要求也存在较大的差异.因此,基于 GDC 的底层基础设施能力,面向不同应用的软件架构及需求而实现的通用资源提供平台有待设计,其中尤其需要考虑资源粒度和应用需求的匹配,以提高资源利用率.

(2) 为了保证应用严格的服务等级协议,对应用进行部署时往往需要在实验环境中测量响应时延和响应结果.很多科研人员在优化算法的研究思路普遍集中于精确建模,如文献[3],然而公有云的性能随着具体运行的应用而变化,同时,任意两个数据中心的通信情况也有很大的差别,因此,在联合云中很难精确得到不同云站点间性能和通信延迟等参数,这会造成其中建模分析以及仿真的结果不够准确.因此在资源优化过程中,保证应用和系统性能监控分析的准确性,需要一个明确的解决方案.

(3) 多云环境中的带宽分配策略,其调度目标比较明确,根据不同流量的时延敏感需求,设计相应的算法,实现交互式实时流量、长传输流量以及背景流量的协调.然而,在目前的研究中,能够综合所有流量进行统一调度的流量工程工作比较单一,如谷歌公司的 B4 系统的 BwE 机制,还可以作进一步的探索.

3.分布式云中访问控制相对于普通的单一云场景下的访问控制,提出了用户信任模型和云间信任模型.整体来说,云安全方面的研究还比较少,有待进一步深入,目前的局限性有:

(1) 分布式云相对于单一云环境,云中的租户关系发生转变,衍生出跨云租户关系.而目前对于跨云租户间的授权访问模型研究得较少,其可能的原因是不同云服务提供商的云间联合架构没有得到实际应用和推广.未来可能的研究方向之一是,将单一云环境下的 RBAC(role-based access control)模型灵活迁移到跨云的租户访问场景下,以实现租户之间的跨云安全访问.

(2) 多云环境下的攻击模式尚不明确,这也导致了该环境下安全策略的发展缓慢.另外,云间的访问控制模型往往需要跨站点获取权限,这在一定程度上降低了云间的访问效率.因此,在保证云间访问安全性的前提下,对如何提高云间访问效率可以进行深入的探索和研究.同时,现有的用户信任模型比较简单,没有考虑用户信任域和 CSP 信任域不匹配的情况.

综上,目前分布式云研究还处于初级阶段,在分布式云领域的研究与工业界结合紧密,可以预计在未来数年内分布式云的研究会慢慢成为焦点.学术界关于分布式云的研究将成为云计算发展的有力助推器,并推动计算机网络体系结构的创新.

## 5 结束语

目前,越来越多的应用都倾向于部署在云平台之上,这对单一云服务提供商的服务提出了挑战.分布式云通过联合多个云站点,构建接近无限大的资源池,这一巨大优势得到了学术界的关注.本文从分布式云架构、资源调度策略以及分布式云安全这 3 个方面展开综述,以期能够为分布式云的未来研究做出一些有价值的探索.

致谢 在此,衷心感谢为本文提出宝贵意见的老师和同学.

**References:**

- [1] Armbrust M, Fox A, Griffith R, *et al.* A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, 2010,53(4):50–58.
- [2] Agarwal S, Dunagan J, Jain N, *et al.* Volley: Automated data placement for geo-distributed cloud services. In: *Proc. of the NSDI*. 2010. 17–32.
- [3] Wu Y, Wu C, Li B, *et al.* Scaling social media applications into geo-distributed clouds. In: *Proc. of the INFOCOM*. IEEE, 2012. 684–692.
- [4] Tordsson J, Montero RS, Moreno-Vozmediano R, *et al.* Cloud brokering mechanisms for optimized placement of virtual machines across multiple providers. *Future Generation Computer Systems*, 2012,28(2):358–367.
- [5] Amazon. Amazon CloudFront. 2012. <http://aws.amazon.com/cloudfront/>
- [6] Amazon EC. Amazon Web services. 2015. <http://aws.amazon.com/es/ec2/>(November 2012)
- [7] DeCandia G, Hastorun D, Jampani M, *et al.* Dynamo: Amazon’s highly available key-value store. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2007,41(6):205–220.
- [8] Moreno-Vozmediano R, Montero RS, Llorente IM. IaaS cloud architecture: From virtualized datacenters to federated cloud infrastructures. *Computer*, 2012,45(12):65–72.
- [9] Sitaram D, Phalachandra HL, Harwalkar S, *et al.* Simple cloud federation. In: *Proc. of the 8th Asia Modelling Symp. (AMS)*. IEEE, 2014. 83–89.
- [10] Moreno-Vozmediano R, Montero RS, Llorente IM. Multicloud deployment of computing clusters for loosely coupled MTC applications. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2011,22(6):924–930.
- [11] Rochweger B, Breitgand D, Epstein A. The reservoir model and architecture for open federated cloud computing. Technical Report, 0018-8646/09, IBM, 2009.
- [12] Bernstein D, Vij D. Intercloud security considerations. In: *Proc. of the 2nd IEEE Int’l Conf. on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*. IEEE, 2010. 537–544.
- [13] Tordsson J, Montero RS, Moreno-Vozmediano R, *et al.* Cloud brokering mechanisms for optimized placement of virtual machines across multiple providers. *Future Generation Computer Systems*, 2012,28(2):358–367.
- [14] Khanna P, Jain S, Babu BV. Cloud broker: Working in federated structures. In: *Proc. of the Int’l Conf. on Advances in Computing*. IEEE, 2014.
- [15] Campbell R, Gupta I, Heath M, *et al.* Open cirrus™ cloud computing testbed: Federated data centers for open source systems and services research. In: *Proc. of the 2009 Conf. on Hot Topics in Cloud Computing*. USENIX Association, 2009. 1.
- [16] Fares M, Loukissas A, Vahdat A, Scalable A. Commodity data center network architecture. In: *Proc. of the SIGCOMM*. Washington, 2008.
- [17] Li D, Chen GH, Ren FY, Jiang CL, Xu MW. Data center network research progress and trends. *Chinese Journal of Computers*, 2014,37(2):259–274 (in Chinese with English abstract).
- [18] Peng L. On the future integrated datacenter networks: Designs, operations, and solutions. *Optical Switching and Networking*, 2016,19:58–65.
- [19] Jain S, Kumar A, Mandal S, *et al.* B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013,43(4):3–14.
- [20] Hong CY, Kandula S, Mahajan R, *et al.* Achieving high utilization with software-driven WAN. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013,43(4):15–26.
- [21] Coady Y, Hohlfeld O, Kempf J, *et al.* Distributed cloud computing: Applications, status quo, and challenges. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2015,45(2):38–43.
- [22] Zhygmanovskiy A, Yoshida N. Distributed cloud bursting model based on peer-to-peer overlay. In: *Proc. of the 3rd Int’l Conf. on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*. IEEE, 2015. 823–828.
- [23] Le K, Guitart J, Torres J, *et al.* Intelligent placement of datacenters for internet services. In: *Proc. of the 31st Int’l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. IEEE, 2011. 131–142.
- [24] Endo PT, de Almeida Palhares AV, Pereira NN, *et al.* Resource allocation for distributed cloud: Concepts and research challenges. *Network*, 2011,25(4):42–46.

- [25] Jiao L, Lit J, Du W, *et al.* Multi-Objective data placement for multi-cloud socially aware services. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2014. 28–36.
- [26] Hao F, Kodialam M, Lakshman TV, *et al.* Online allocation of virtual machines in a distributed cloud. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2014. 10–18.
- [27] Jiao L, Li J, Xu T, *et al.* Cost optimization for online social networks on geo-distributed clouds. In: Proc. of the 20th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2012. 1–10.
- [28] Qureshi A, Weber R, Balakrishnan H, *et al.* Cutting the electric bill for Internet-scale systems. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009,39(4):123–134.
- [29] Rao L, Liu X, Xie L, *et al.* Minimizing electricity cost: Optimization of distributed internet data centers in a multi-electricity-market environment. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2010. 1–9.
- [30] Xu H, Li B. Joint request mapping and response routing for geo-distributed cloud services. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2013. 854–862.
- [31] Kessaci Y, Melab N, Talbi EG. A Pareto-based metaheuristic for scheduling HPC applications on a geographically distributed cloud federation. Cluster Computing, 2013,16(3):451–468.
- [32] Gao PX, Curtis AR, Wong B, *et al.* It's not easy being green. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012,42(4): 211–222.
- [33] Breitgand D, Marashini A, Tordsson J. Policy-Driven service placement optimization in federated clouds. IBM Research Division, 2011,9:11–15.
- [34] Hu Y, Wong J, Iszlai G, *et al.* Resource provisioning for cloud computing. In: Proc. of the 2009 Conf. of the Center for Advanced Studies on Collaborative Research. IBM Corp., 2009. 101–111.
- [35] Alicherry M, Lakshman TV. Network aware resource allocation in distributed clouds. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2012. 963–971.
- [36] Lucas-Simarro JL, Moreno-Vozmediano R, Montero RS, *et al.* Scheduling strategies for optimal service deployment across multiple clouds. Future Generation Computer Systems, 2013,29(6):1431–1441.
- [37] Yabusaki H, Nakagoe H, Murayama K, *et al.* Wide area tentative scaling (WATS) for quick response in distributed cloud computing. In: Proc. of the 2014 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2014. 31–36.
- [38] Van den Bossche R, Vanmechelen K, Broeckhove J. Cost-Optimal scheduling in hybrid iaas clouds for deadline constrained workloads. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Cloud Computing (CLOUD). IEEE, 2010. 228–235.
- [39] Javadi B, Abawajy J, Buyya R. Failure-Aware resource provisioning for hybrid cloud infrastructure. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2012,72(10):1318–1331.
- [40] Vecchiola C, Calheiros RN, Karunamoorthy D, *et al.* Deadline-Driven provisioning of resources for scientific applications in hybrid clouds with Aneka. Future Generation Computer Systems, 2012,28(1):58–65.
- [41] Wright P, Sun YL, Harmer T, *et al.* A constraints-based resource discovery model for multi-provider cloud environments. Journal of Cloud Computing, 2012,1(1):1–14.
- [42] Cerroni W. Multiple virtual machine live migration in federated cloud systems. In: Proc. of the 2014 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2014. 25–30.
- [43] Travostino F, Daspit P, Gommans L. Seamless live migration of virtual machines over MAN/WAN. Future Generation, Computer System, 2006, 901–907.
- [44] Li Q, Huai J, Li J, Wo T, Wen M. HyperMIP: Hypervisor controlled mobile IP for virtual machine live migration across network. In: Proc. of the IEEE High Assurance Systems Engineering Symp. 2008. 80–88.
- [45] Harney E, Goasguen S, Martion J. The efficacy of live virtual machine migrations over the Internet. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Virtualization Technology in Distributed Computing. Reno, 2007.
- [46] Watanabe H, *et al.* A performance improvement method for the global live migration of virtual machine with IP mobility. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010). 2010. 194–199.



- [47] Kondo T, Aibara R, Suga K. A mobility management system for the global live migration of virtual machine across multiple sites. In: Proc. of the 38th IEEE Annual Int'l Computers, Software and Applications Conf. Workshops. 2014.
- [48] Celesti A, Tusa F, Villari M. Improving virtual machine migration in federated cloud environments. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Evolving Internet. 2010.
- [49] Greenberg A, Hamilton J, Maltz DA, *et al.* The cost of a cloud: Research problems in data center networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,39(1):68–73.
- [50] Chen Y, Jain S, Adhikari VK, Zhang ZL, Xu K. A first look at inter-data center traffic characteristics via Yahoo! datasets. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2011. 2011.
- [51] Ford D, Labelle F, Popovici FI, *et al.* Availability in globally distributed storage systems. In: Proc. of the OSDI. 2010. 1–7.
- [52] Laoutaris N, Sirivianos M, Yang X, *et al.* Inter-Datacenter bulk transfers with netstitcher. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011,41(4):74–85.
- [53] Feng Y, Li B, Li B. Jetway: Minimizing costs on inter-datacenter video traffic. In: Proc. of the 20th ACM Int'l Conf. on Multimedia. ACM, 2012. 259–268.
- [54] Wu Y, Zhang Z, Wu C, *et al.* Orchestrating bulk data transfers across geo-distributed datacenters. IEEE Trans. on Cloud Computing, 2017,5(1):112–125.
- [55] Zhang H, Chen K, Bai W, *et al.* Guaranteeing deadlines for inter-datacenter transfers. In: Proc. of the 10th European Conf. on Computer Systems. ACM, 2015. 20.
- [56] Kumar A, Jain S, Naik U, *et al.* BwE: Flexible, hierarchical bandwidth allocation for WAN distributed computing. In: Proc. of the 2015 ACM Conf. on Special Interest Group on Data Communication. ACM, 2015. 1–14.
- [57] Bohli JM, Gruschka N, Jensen M, *et al.* Security and privacy-enhancing multicloud architectures. IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing, 2013,10(4):212–224.
- [58] AlZain MA, Pardede E, Soh B, *et al.* Cloud computing security: From single to multi-clouds. In: Proc. of the 45th Hawaii Int'l Conf. on System Science (HICSS). IEEE, 2012. 5490–5499.
- [59] Cascella RG, Morin C, Banâtre JP, *et al.* Private-by-Design: Towards personal local clouds [Ph.D. Thesis]. Inria Rennes, 2014.
- [60] Yu S, Wang C, Ren K, *et al.* Achieving secure, scalable, and fine-grained data access control in cloud computing. In: Proc. of the Infocom. IEEE, 2010. 1–9.
- [61] Vimercati SDCD, Foresti S, Paraboschi S, *et al.* Shuffle index: Efficient and private access to outsourced data. ACM Trans. on Storage (TOS), 2015,11(4):19.
- [62] Celesti A, Tusa F, Villari M, *et al.* Security and cloud computing: intercloud identity management infrastructure. In: Proc. of the 19th IEEE Int'l Workshop on Enabling Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises (WETICE). IEEE, 2010. 263–265.

#### 附中文参考文献:

- [17] 李丹,陈贵海,任丰原,蒋长林,徐明伟. 数据中心网络的研究进展与趋势. 计算机学报, 2014, 37(2): 259–274.



张晓丽(1993—),女,山西运城人,博士,主要研究领域为云计算,网络功能虚拟化,网络安全.



孙晓晴(1995—),女,博士,主要研究领域为计算机网络,网络管理与测量,网络空间安全.



杨家海(1966—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为计算机网络,网络管理与测量,网络空间安全,云计算.



吴建平(1953—),男,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士,CCF会士,主要研究领域为计算机网络体系结构,下一代互联网,网络协议工程学.