

云计算弹性测试研究

胡亚洲¹ 邓波¹ 林旺群¹ 彭甫阳¹ 王东霞²

(北京系统工程研究所 北京 100101)¹

(北京系统工程研究所信息安全技术重点实验室 北京 100101)²

摘要 弹性作为云计算的关键特征,能够支持资源的快速扩展、灵活配置、动态增加和释放,使得资源充分利用,同时降低云服务提供商和用户的成本。为了检测弹性是否满足用户的服务等级协议和资源的合理配置,需要对其进行评估和测试。在分析弹性定义、实现方法和评测指标的基础上,提出弹性测试的概念,总结了目前弹性测试的相关研究,分析了弹性测试的关键技术和架构,指出弹性测试面临的挑战和问题,并给出了弹性测试的进一步研究方向。

关键词 云计算,云测试,弹性,弹性测试

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.002

Study on Testing Cloud Computing Elasticity

HU Ya-zhou¹ DENG Bo¹ LIN Wang-qun¹ PENG Fu-yang¹ WANG Dong-xia²

(Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China)¹

(National Key Laboratory of Science and Technology on Information System Security, Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China)²

Abstract Elasticity is the key feature of cloud computing, which can support resources to elastically expand, fast configured, flexibly add and remove, and it can make full use of cloud resources and reduced the cost of cloud services providers and users. To evaluate whether elasticity meet the SLA (Service Level Agreement) requirements and make full use of cloud resources, we should evaluate and test elasticity of cloud computing. In this paper, we introduced the definition of elasticity, solutions and metrics for elasticity. Then we proposed the definition of cloud computing elasticity testing, and summarized some correlational researches of cloud computing elasticity testing. Next, we summarized its key technologies and frameworks. We also discussed some challenges and issues on testing cloud computing elasticity. Finally, we put forward the further research direction of cloud computing elasticity testing.

Keywords Cloud computing, Cloud testing, Elasticity, Elasticity testing

云计算^[1]是目前信息技术领域的研究热点之一,其正逐渐改变资源和服务的获取方式。在工业界,许多云服务提供商推出了自己的云服务平台,如 Amazon 的弹性计算云(Elastic Compute Cloud, EC2)^[2]、Google 的 Google App Engine^[3]、IBM 的蓝云(Blue Cloud)^[4]、Microsoft 的 Azure^[5]、Salesforce.com 的客户管理服务(CRM)^[6]、阿里巴巴的阿里云^[7]等;同时学术界也针对云计算展开了相关的研究,如资源优化、成本节约、软件测试、能耗降低等问题。近几年,云计算以其强大的资源获取和服务能力的优势得到迅速发展。据 CCW Research 研究分析,2014 年中国云建设市场规模为 383.6 亿元,同比 2013 年增长 44.1%;云市场规模达到 1645.8 亿元,同比 2013 年增长 28.0%。

根据 NIST 关于云计算的定义^[7],云计算服务包括基础

设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)和软件即服务(SaaS)。用户可以使用不同的服务形式按需(on-demand)获取需要的资源,同时通过计时付费(pay-as-you-go)的方式便捷合理地支付费用给云服务提供商。

但是,目前云计算仍然存在一些问题,例如安全问题、能耗问题、资源优化问题等。为了检测云服务平台的服务质量(Quality of Service, QoS)和服务等级协议(Service Level Agreement)^[8]的满足情况,许多研究者提出了云测试的概念^[9-14],并进行了相关的分析研究^[18-43]。例如, Bai 等人^[10]分析总结了云测试工具,包括云基准测试(Benchmark)工具(例如 YCSB^[15]等)和商业测试工具(例如 SOASTA^[16]、ITKO LISA^[17]等); Yu 等人^[18]提出测试即服务(TaaS)的概念。同时,软件测试国际会议 ICST 于 2009 年开始单独针对云测试

到稿日期:2015-11-23 返修日期:2016-02-26 本文受国家 863 高技术研究发展计划基金项目(2013AA01A215),国家自然科学基金项目(61271252)资助。

胡亚洲(1992-),男,硕士,主要研究方向为云计算、大数据等, E-mail: hyz1011088@sina.com; 邓波(1973-),男,博士,研究员,主要研究方向为分布式计算、云计算、大数据等; 林旺群(1983-),男,博士,主要研究方向为云计算、大数据等; 彭甫阳(1962-),男,博士,研究员,主要研究方向为云计算等; 王东霞(1974-),女,博士,研究员,主要研究方向为信息安全、可信计算等。

举办会议 STITC,专门研讨云测试相关问题。

弹性作为云计算的关键特征之一,能够支持资源的按需获取、灵活配置、动态扩展,在云测试领域受到了广泛关注。云服务提供商(例如 Amazon、IBM、阿里云等)针对云服务平台的弹性策略进行测试分析,以达到更好的 QoS 和 SLA;科研机构(例如德国 KIT 的笛卡尔研究组、维也纳技术大学的分布式系统研究小组等)设计不同 Benchmark 对云平台的弹性进行测试,以评估云平台弹性的优劣。但是由于不同的云服务提供商和研究者对于弹性有着不同的定义和理解,同时不同的云服务平台实现弹性的方法不尽相同,导致弹性的评估和测试面临较大挑战。

本文从云计算弹性出发,梳理总结了云计算弹性测试的概念、相关研究、关键技术、测试架构等现状。首先对云计算弹性的定义、实现方法和评测指标进行介绍;然后给出弹性测试的概念,总结目前弹性测试的相关研究,接着概括弹性测试的关键技术和架构,之后对弹性测试面临的挑战和问题进行讨论;最后给出了弹性测试的进一步研究方向。

1 弹性

弹性是云计算的关键特征之一,能够支持用户动态地增加和释放云资源,满足用户按需获取资源的需求。本节从弹性定义、弹性与可扩展性、弹性实现方法和弹性评价指标等方面对弹性进行阐述。

1.1 弹性定义

目前已有很多机构和学者对弹性展开研究,但是目前还没有统一、明确的弹性定义,下面介绍一些研究者和研究机构关于弹性的定义。

文献[7]中,NIST 定义弹性是动态获取或释放资源的能力,是在某些外在和内因的需求下,能够自动化地扩展规模的能力;文献[44]中,IBM 定义弹性是可扩展性的重命名,是一种自动增加或减少资源的能力;文献[45]中,OCDA 定义弹性是一种基于负载而进行增加或减少资源的能力;Cohen 等人^[46]定义弹性是可量化的管理、测量、预测和适应应用程序资源的响应能力;Herbst 等人^[47]定义弹性是系统为了适应负载变化而自动进行资源配置和供应,以尽可能匹配当前负载需求的能力;Cooper 等人^[15]定义弹性为系统可以通过部署新的实例和转移负载以增强系统的能力;Aisopos 等人^[48]定义弹性是系统动态地分配内存、CPU 和磁盘到一个特定的工作,以调节系统运行状态的能力;Li 等人^[49]定义弹性为系统适应负载变化的速度大小;Perez-Sorrosal 等人^[50]定义弹性是在没有其他服务中断的情况下,为了适应负载变化而增加或减少资源的能力;Han 等人^[51]定义弹性为通过增加或减少资源以满足应用需求的能力;Najjar 等人^[52]定义弹性为快速请求、获取和释放所需求资源的能力。

总结上述关于弹性的定义,弹性经常用自动配置、资源、负载、能力等词语来描述。综合分析,本文给出弹性的定义:弹性是云计算的一种属性,是云平台为了适应负载变化而自动增加或释放资源,以满足并匹配用户需求的能力。

1.2 弹性与可扩展性

与弹性类似,可扩展性是指系统为了适应负载的变化,而在合理程度上改变计算资源的能力^[47,53-54]。但是可扩展性和

弹性存在以下区别。

1)可扩展性是静态属性,而弹性是动态属性。可扩展性是指系统能扩展到一定规模的能力,而弹性是指系统按需动态增加或释放计算资源的能力。

2)可扩展性不是按需进行资源的增加或释放,而弹性是按需进行资源的增加或减少。

3)可扩展性不考虑系统增加(或释放)资源的粒度、速度、频率等要素,但是弹性关注这些方面。

1.3 弹性的实现方法

弹性的实现方法主要包括横向缩放、纵向缩放和迁移^[55-56]3种。

1)横向缩放

横向缩放是指在用户的虚拟环境中增加或减少实例数,这些实例可以是虚拟机、容器或应用模块。横向缩放是目前实现弹性最常见的方法,在文献[57-61]中均有体现。

2)纵向缩放

纵向缩放是指对虚拟机实例增加或减少资源,如处理器、内存和硬盘等。文献[62-65]即采用了这种方法实现弹性。

3)迁移

迁移是指把一个正在运行的虚拟机或应用从一个服务器迁移到另外一个服务器,以达到负载均衡的目的。迁移通常是用来模拟云的行为,文献[66-67]采用迁移的方法实现了弹性。

1.4 弹性评价指标

弹性是云计算的关键特征之一,如何对弹性进行评价是一个值得考虑的问题,文献[47,56,68-70]对于弹性的评价指标进行了分析讨论,但是每个研究者关注的弹性指标不尽相同。通过对上述文献的总结分析,本文从时间、资源、颠簸次数、价格4个方面介绍弹性的评价指标。

1.4.1 时间

时间是弹性测试过程中需要考虑的重要因素,动态配置的时间长短将会直接影响弹性的好坏。对于时间这一评价指标,从资源配置不足时间和资源配置过剩时间两方面进行考虑^[70]。

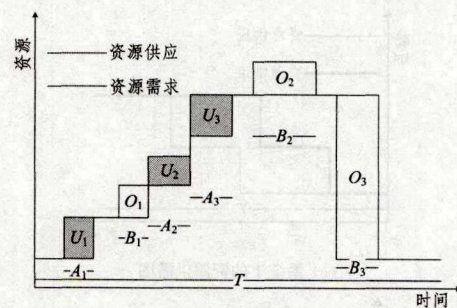


图1 资源供需图

如图1所示, A_1, A_2, A_3 是资源配置不足的时间段, B_1, B_2, B_3 是资源配置过剩的时间段, $\sum A$ 是资源配置不足时间段的总和, $\sum B$ 是资源配置过剩时间段的总和, T 是系统运行的总时间。资源配置不足时间比和资源配置过剩时间比的定义如下。

资源配置不足时间比:

$$Rate_{time} = \frac{\sum A}{T} \quad (1)$$

资源配置过剩时间比:

$$Rate_{O_{time}} = \frac{\sum B}{T} \tag{2}$$

通常情况下,资源配置不足时间比和资源配置过剩时间比越小代表弹性越好,但是具体评价时还需要参考不同的云平台和应用情景。

1.4.2 资源

资源是弹性评价需要考虑的另一个重要指标,当资源配置不足时会影响 QoS,当资源配置过剩时又会造成资源的浪费。Herbst 等人^[47]使用平均资源配置不足量和平均资源配置过剩量对弹性进行评价。如图 1 所示, U_1, U_2, U_3 是资源配置不足量, O_1, O_2, O_3 是资源配置过剩量, T 是系统运行的总时间。 $\sum U$ 是资源配置不足量的总和, $\sum O$ 是资源配置过剩量的总和。平均资源配置不足量和平均资源配置过剩量的定义如下。

平均资源配置不足量:

$$Av-R_{U_{resource}} = \frac{\sum U}{T} \tag{3}$$

平均资源配置过剩量:

$$Av-R_{O_{resource}} = \frac{\sum O}{T} \tag{4}$$

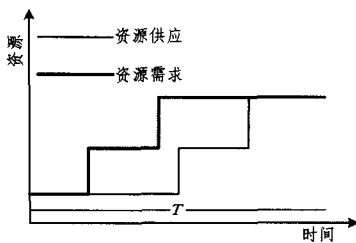
通常情况下,平均资源配置不足量和平均资源配置过剩量越小代表弹性越好,但是具体需根据云平台和应用场景进行分析。

1.4.3 颠簸次数

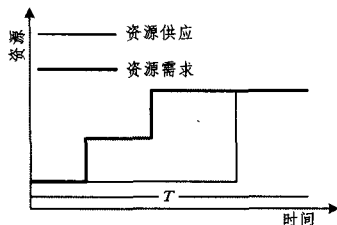
若云平台每次分配(或释放)超过一个资源单元,调整次数按照每次调整一个资源单元进行计算。在系统运行总时间 T 内,资源供应曲线的调整次数记为 N_s ,资源需求曲线的调整次数记为 N_d 。颠簸次数是指资源供应曲线的调整次数和资源需求曲线的调整次数之差的绝对值。文献^[70]采用平均颠簸次数作为度量指标进行弹性度量,定义如下。

平均颠簸次数:

$$Av-Num_{jitter} = \frac{|N_s - N_d|}{T} \tag{5}$$



(a) 系统 1 的资源供需图



(b) 系统 2 的资源供需图

图 2 系统 1 和系统 2 的资源供需图

如图 2 所示,系统 1 和系统 2 的资源需求均需要两阶段

调整。系统 1 资源供应进行了两阶段调整,而系统 2 资源供应只进行了一个大的阶段调整,但由分析可知,系统 1 和系统 2 的 N_s, N_d 都相同,平均颠簸次数均为 0,在平均颠簸次数方面系统 1 和系统 2 弹性相同。通常情况下,平均颠簸次数越小代表系统弹性越好,但是具体评价还需要根据系统需求进行判断。

1.4.4 价格

随着云服务的商业化,弹性也被封装成一种服务提供给用户,因此价格成为除时间、资源、颠簸次数以外的另一弹性评价指标。云服务提供商针对封装的弹性服务(如阿里云的弹性伸缩、Amazon 的 Auto Scaling)制定了不同的价格策略。用户使用的弹性服务成本的高低影响着用户对于弹性的评价。

除了上述 4 种基本的弹性评价指标之外,还有研究者提出了延迟^[56]、指标聚合^[70]等评价指标,但是这些评价指标是上述 4 个基本评价指标的变种或组合,因此在本文中只总结这 4 种基本评价指标。

2 弹性测试

2.1 弹性测试概念和相关研究

弹性测试是针对云计算的弹性特征进行的测试和评估,云平台适应负载变化而动态调整资源,以满足并匹配用户需求能力的测试和评估。由于弹性在云计算中的重要性,学术界和工业界也对弹性测试展开了众多的研究。

1) 基于时间指标的弹性测试

Brebner 等人^[74]提出了一种对云应用的弹性进行建模和预测的方法,该方法对云平台的主要成分进行建模,通过对云平台行为的分析对弹性响应时间进行预测。

2) 基于资源指标的弹性测试

Bersani 等人^[75]形式化了基于时序逻辑弹性系统的概念,之后通过测试资源配置过量、资源配置不足量等指标进行弹性分析评测。

3) 基于价格指标的弹性测试

Folkerts 等人^[76]提出了一种价格驱动的弹性评测手段,通过对有弹性的系统和没有弹性的系统在负载执行过程中的成本分析,进行弹性的分析对比。

Tinnefeld 等人^[79]提出了测评云数据库管理系统弹性的方法。与文献^[76]类似,该方法主要根据价格因素分析特定系统的弹性性能。

Sharma 等人^[81]提出了价格驱动的弹性测评算法,通过应用 Kingfisher 系统对 Amazon EC2 和私有云进行弹性测评。

4) 基于混合指标的弹性测试

Li 等人^[71]提出了基于日志的测试方法。对于弹性测试,他们提出了伸缩延迟、资源释放时间、成本和时间效率作为弹性测试的测评指标。通过实验分析, Li 等人认为小实例比大实例能够提供更好的弹性。

Herbst 等人^[68]提出了 4 个弹性评测指标,通过测量资源需求和供应时间差之间的指标变化从而对线程池的弹性进行评测分析。

Coutinho 等人^[72]提出了基于分配时间和资源的弹性测

试方法,定义了系统资源配置不足状态(可动态增加资源配置)和资源固定状态,通过对比系统在资源配置不足状态和资源配置固定状态下测评指标的变化来进行弹性的分析。

Shawky 等人^[73]类比于物理学中的压力和压强的概念对云计算基础设施层的弹性进行测评。压力是指需求(或获取)的云计算资源,压强是指数据传输率和伸缩一个资源粒度的时间,该实验通过减少虚拟机总量进行分析测试。

与文献^[76]类似,文献^[77]提出了一个基于价格和性能指标综合分析的弹性评测架构。通过设计变化的负载、测量价格和最大延迟等指标来对弹性进行分析。

Islam 等人^[78]提出用户对云平台的弹性进行测量的方法。测量主要考虑价格和 SLAs 等指标,同时考虑了用户理论获取资源和实际可用资源的差别等实际问题,然后设计负载对弹性进行了评测。

Moldovan 等人^[40]提出 MELA 架构,该架构的目标是给

云服务提供商提供分析资源弹性、价格弹性和质量弹性的方法。该架构能够将底层的监控数据和高层次的监控数据结合分析,同时能够分析弹性指标之间的关系,给云服务商提供监控和分析工具。

Herbst 等人^[70]提出一种基准测试方法 BUNGEE,该基准测试方法针对 IaaS 云(AWS(Amazon Web Service)云、基于 CloudStack 的私有云)的弹性进行测试。通过提出弹性测量指标,监控分析指标数据,来分析云平台的弹性性能。

Moldovan 等人^[80]提出分析弹性要素之间关系的方法,通过监控弹性需求提出之后云平台各项指标的变化,对弹性要素之间的相互影响关系进行分析。该方法基于 MELA 架构,但弥补了该架构不能分析弹性指标之间关系的不足。

接下来从测试者类型、被测对象、提出模型、测试指标共 4 个方面对目前弹性测试的典型研究进行对比分析,相关研究如表 1 所列。

表 1 弹性测试相关研究对比

相关研究	测试者类型	被测对象	提出模型	测试指标
Moldovan 等人 ^[40]	云服务提供商	Openstack	MELA	价格、质量、资源
Gambi 等人 ^[42]	用户	Openstack, Amazon EC2	AuToCLES	数据库和弹性数据库数据
Herbst 等人 ^[68]	用户	Java Thread Pool	平台配置对弹性影响模型	延迟时间、线程池大小
Herbst 等人 ^[70]	用户	AWS, Cloudstack	BUNGEE	时间、资源、配置次数以及聚合指标
Coutinho 等人 ^[72]	用户	OpenNebula	基本资源和时间分配的弹性测试方法	时间、资源
Shawky 等人 ^[73]	用户	CloudSim	基于“压力”和“压强”的弹性测评方法	虚拟机数、时间
Brebner 等人 ^[74]	用户	云应用	弹性建模和预测方法	时间、价格
Bersani 等人 ^[75]	用户	Openstack	AuToCLES 的改进模型	基于时序逻辑的资源使用情况
Islam 等人 ^[78]	用户	Amazon EC2	用户测试弹性模型	价格、SLA 指标
Tinnefeld 等人 ^[79]	用户	云数据库管理系统	基于价格的弹性评测方法	价格
Moldovan 等人 ^[80]	用户	Openstack	MELA 的改进模型	价格、质量、资源
Sharma 等人 ^[81]	用户	Amazon EC2, 私有云	Kingfisher	价格

从表 1 中可以看出,大部分的研究者都是从用户的角度对云计算弹性进行测试,被测对象大多数都是 IaaS 云,测试指标除了时间、资源、配置次数等技术指标之外,还有价格等经济指标。

2.2 弹性测试架构和关键技术

2.2.1 弹性测试架构

总结分析目前弹性测试的相关研究,将弹性测试架构概括为 3 个模块:负载产生模块、指标监测模块、弹性评估模块,3 个模块之间的关系如图 3 所示。

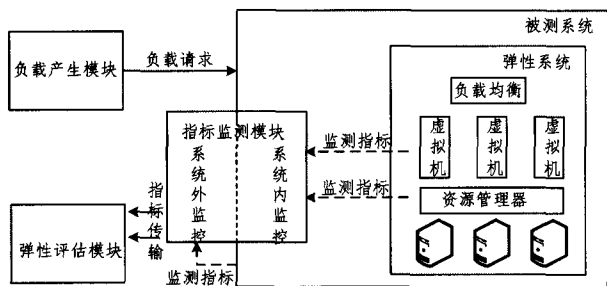


图 3 弹性测试架构

负载产生模块负责产生测试过程中需要的资源和服务请求,在测试架构中占重要地位。好的负载产生模块能够产生各种形式的负载请求,能够充分调度系统的弹性机制,从而更充分地测试系统的弹性性能。

指标监测模块负责监测测试过程中系统的各项指标,在

测试架构中占核心地位。指标监测模块需要确定监测的指标项、监测时间间隔等具体内容,同时由于被测系统内有些指标很难被精确监测,因此指标监测模块也是测试架构中的难点。

弹性评估模块负责对监测到的弹性指标进行分析计算,以对系统弹性进行评估。弹性评测模块需要对弹性的计算和评价方式做出具体规定,以形成弹性的测评结果反馈给测试者。

2.2.2 弹性测试关键技术

弹性测试架构主要包括负载产生、指标监控和弹性评估 3 个模块,下文将围绕这 3 个模块对弹性测试的关键技术进行概括。

(1) 负载设计技术

云服务的负载类型包括线性模式、指数模式和随机模式^[82],因此需要在测试过程中设计平缓变化的负载、爆发式变化的负载和分阶段变换式的负载来模拟真实的系统负载场景。

目前比较常见的负载生成器有 JMeter^[83], Faban^[84], Siege^[85], TPC-W^[86] 等。JMeter 是 Apache 的 Java 负载生成器,能够对服务和 Web 应用的性能进行分析和测量; Faban 是 Sun 的 Java 负载生成工具,能够对数据库等进行测试,同时支持随机模型; Siege 是基于 Linux 的负载生成工具,可以对网站进行多用户的并发访问; TPC-W 是威斯康辛大学开发的负载生成工具,主要用于测试系统的效能并给予量化分析。

弹性测试实验中,有些研究者直接调用这些负载产生工具,同时也有些研究者根据实际应用场景进行负载设计。例如,Is-lam等人^[78]采用了TPC-W和JMeter两种负载产生工具,Copil等人^[41]采用了在线视频流服务作为负载产生工具,Herbst等人^[70]采用JMeter产生需要的负载。

由于云系统结构和服务的复杂性,如何产生充分调度系统弹性机制的负载是弹性测试需要考虑的重要问题,因此负载设计技术是弹性测试的关键技术之一。

(2)云监测技术

云监测技术主要对云资源和服务两个层次进行检测,检测的资源指标主要有CPU、内存等,服务指标主要有延迟、吞吐率等。

目前比较常见的云监测工具有Cloudwatch^[87],Chukwa^[88],Ganglia^[89],Nagios^[90],C-meter^[91]等。Cloudwatch是Amazon推出的云监测工具,用于对Amazon云平台的服务质量进行监控;Chukwa是Yahoo!在Hadoop架构基础上开发的用于监控云平台服务的工具;Ganglia是针对资源测试的分布式监控工具,该工具可以监控CPU、内存、I/O等资源数据,对资源性能有着很好的监测;Nagios是应用在Eucalyptus云平台上的监控工具,该工具能够支持物理机和虚拟机运行状态的监控;C-meter是在Grenchmark协议的基础上开发的分布式资源监控工具,主要针对虚拟机性能进行监控。在实际弹性测试中,研究者通常直接调用这些检测工具进行弹性指标的检测。例如,Moldovan等人在文献^[40, 80]中采用了Ganglia进行弹性指标数据的收集。

弹性指标是弹性评测的重要依据,而云监测技术是获取弹性指标的基础,因此云监测技术是弹性测试的关键技术。

(3)基准测试技术

基准测试技术是指通过标准的测试方法、测试过程、测试工具对测试对象进行评估测试的技术。基准测试是弹性测试标准化的趋势。

目前基准测试技术受到学术界和工业界的广泛关注。传统基准测试技术有:对处理器性能测试的SPEC CPU,对数据库性能测试的TPC-C和TPC-E,对高性能计算测试的LINPACK,对文件系统性能测试的Bonnie和Bonnie++等;云环境下的基准测试有:英特尔开发的对于小型集群测试的BITT,Yahoo!公司的针对云数据库测试的YCSB,Hadoop自带的测试MapReduce和HDFS性能的Gridmix等。虽然目前弹性测试取得了一定成果,但是还没有比较成熟的基准测试工具对云计算弹性进行测试。

2.3 弹性测试的挑战和问题

虽然现有研究已经解决了云计算弹性测试的一些问题,但是弹性测试依然存在以下挑战和问题。

(1)缺少权威的基准测试工具

总结现有的研究可以发现,研究者针对不同的云平台设计了不同的弹性测试架构,但是不同云平台之间的弹性测试结果不能进行横向比较,测试架构不具有通用性和权威性。例如,文献^[70]提出BUNGEE测试架构,但是该架构只能对Amazon AWS和Cloudstack的弹性进行测试评估。

不同云平台提供资源和服务形式的不同,增加了设计基

准测试架构的难度。同时不同云平台弹性机制的不同,增加了负载生成的难度,使得基准测试工具成为弹性测试标准化的难点。

(2)没有统一的弹性评价指标

从表1中可以看出,不同的研究者关注的弹性指标不尽相同。有些研究者关注服务层面的指标,例如延迟时间、价格等;有些研究者关注资源层面的指标,如虚拟机数、CPU、内存等。总的来说,目前对于弹性的评价指标没有统一的规定,弹性的评测没有具体的标准,使得弹性测试结果不具有横向对比性。

(3)弹性实现机制不够透明

目前针对弹性的测量主要从用户的角度出发,通常采用黑盒的模式对弹性进行测试。与此同时,目前许多云平台弹性机制的实现是不对用户透明的,由于黑盒测试的局限性,使得弹性测试不够充分,这给弹性测试带来了一定挑战和困难。

3 进一步的研究方向

根据弹性测试的研究现状、挑战和问题,本节提出弹性测试的进一步研究方向,主要从弹性基准测试工具和评价指标、弹性的成本分析和弹性管理^[81,92]3个方面进行分析。

(1)弹性基准测试工具和评价指标

现阶段针对弹性没有成熟、权威的基准测试工具,许多研究者提出的测试架构也仅仅针对单一的云平台,因此弹性基准测试工具是弹性测试的研究方向之一。

同时,不同云平台弹性机制的实现不同,对于弹性指标的关注也不同,因此选择统一的弹性评价指标去横向比较云平台之间的弹性差异也是弹性测试需要考虑的研究方向。

(2)弹性的成本分析

现阶段有些研究者提出价格驱动的弹性评测方法^[78-79],但是也仅仅考虑了用户租用云平台的花费,这对于评估弹性的实现代价是不全面的,因此需要综合考虑弹性的实现成本。

弹性的成本分析不仅需要用户租用云平台的价格,而且需要考虑弹性实现过程中云平台的资源使用情况,例如虚拟机数、内存、I/O、带宽等。只有对弹性实现成本进行透彻的分析,才能更好地对弹性进行评测,因此弹性实现成本的细化分析是弹性测试的进一步研究方向。

(3)弹性管理

用户对云平台进行弹性测试是为了评价云平台弹性的好坏,以便更好地选择合适的云平台;云资源、服务提供商对云平台的弹性进行测试是为了优化弹性机制、实现弹性管理,以便提供更好的弹性服务。

弹性管理是云服务提供商在用户和商业目的之间进行的权衡,从而提供更好的弹性服务。目前弹性管理的解决方案有价格驱动的请求调度方法、基于SLA的准入控制方法、集成和自主弹性控制方法等。

弹性管理是弹性测试工作的延续和目的,是弹性测试需要进一步研究的方向。

结束语 目前,云计算是工业界和学术界的研究热点之一,正改变着人们获取资源和服务的方式。弹性作为云计算的主要特征之一,备受研究者的关注。为了对云计算弹性性

能进行评价,许多研究者针对弹性开展了一系列的测试研究。本文从云计算弹性入手,在分析了相关研究的基础上,对弹性的评测指标、关键技术和架构进行了详细的阐述,同时讨论了弹性测试面临的挑战和研究问题,最后给出了弹性测试的进一步研究方向。

参考文献

- [1] ARMBRUST M, FOX O, GRIFFITH R, et al. Above the clouds: a Berkeley view of cloud computing[J]. Eecs Department University of California Berkeley, 2009, 53(4): 50-58.
- [2] Amazon elastic compute cloud (Amazon EC2)[OL]. <http://aws.amazon.com/cn/ec2>.
- [3] ZAHARIEV A. Google app engine[J]. Helsinki University of Technology, 2009.
- [4] SIMS K. IBM Blue Cloud initiative advances enterprise cloud computing[OL]. <http://www-03.ibm.com/press/us/en/press-release/26642.wss>. (Accessed on: January 23, 2013), 2009.
- [5] Microsoft azure [EB/OL]. <http://www.microsoft.com/azure>.
- [6] Salesforce.com [EB/OL]. <http://www.force.com>.
- [7] MELL P, GRANCE T. The NIST definition of cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2011, 53(6): 50.
- [8] MIROBI G J, AROCKIAM L. Service Level Agreement in cloud computing: An overview[C]// International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies. IEEE, 2016.
- [9] GAO J, BAI X, TSAI W T. Cloud testing-issues, challenges, needs and practice[J]. Software Engineering: An International Journal, 2011, 1(1): 9-23.
- [10] BAI X, LI M, CHEN B, et al. Cloud testing tools[C]// 2011 IEEE 6th International Symposium on Service Oriented System Engineering (SOSE). IEEE, 2011: 1-12.
- [11] RIUNGU KALLIOSAARI L, TAIPALE O, SMOLANDER K. Testing in the cloud: Exploring the practice[J]. Software, IEEE, 2012, 29(2): 46-51.
- [12] INCKI K, ARRI I, SÖZER H. A survey of software testing in the cloud[C]// 2012 IEEE Sixth International Conference on Software Security and Reliability Companion (SERE-C). IEEE, 2012: 18-23.
- [13] PRIYADARSINK K, BALASUBRAMANIAN V, KARTHIK S. Cloud testing as a service[J]. International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 2011, 6(2): 173-177.
- [14] KUMAR R, SINGH S. Cloud Testing: Perspectives and Challenges[J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 106(17): 975-8887.
- [15] COOPER B F, SILBERSTEIN A, TAM E, et al. Benchmarking cloud serving systems with YCSB[C]// Proceedings of the 1st ACM Symposium on Cloud Computing. ACM, 2010: 143-154.
- [16] SOASTA [EB/OL]. <http://www.SOASTA.com>.
- [17] ITKO [EB/OL]. <http://www.itko.com>.
- [18] YU L, TSAI W T, CHEN X, et al. Testing as a Service over Cloud[C]// 2010 Fifth IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering (SOSE). IEEE, 2010: 181-188.
- [19] Cloud-intelligence. Cloud-testing whitepaper [EB/OL]. [2011-03-24]. http://www.cloud-intelligence.com/files/Cloud%20Testing%20White%20Paper_0.pdf.
- [20] RIUNGU L M, TAIPALE O, SMOLANDER K. Research issues for software testing in the cloud[C]// 2010 IEEE Second International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). IEEE, 2010: 557-564.
- [21] RIUNGU L M, TAIPALE O, SMOLANDER K. Software testing as an online service: Observations from practice[C]// 2010 Third International Conference on Software Testing, Verification, and Validation Workshops (ICSTW). IEEE, 2010: 418-423.
- [22] LI Q, KE D L, WANG X L. Brief survey on cloud testing[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(12): 4401-4406. (in Chinese)
李乔, 柯栋梁, 王小林. 云测试研究现状综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4401-4406.
- [23] GAISBAUER S, KIRSCHNICK J, EDWARDW N, et al. Vats: Virtualized-aware automated test service[C]// Fifth International Conference on Quantitative Evaluation of Systems, 2008 (QEST'08). IEEE, 2008: 93-102.
- [24] CIORTEA L, ZAMFIR C, BUCUR S, et al. Cloud9: A software testing service[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2010, 43(4): 5-10.
- [25] BANZAI T, KOIZUMI H, KANBAYASHI R, et al. D-cloud: Design of a software testing environment for reliable distributed systems using cloud computing technology[C]// Proceedings of the 2010 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing. IEEE Computer Society, 2010: 631-636.
- [26] ORIOL M, ULLAH F. Yeti on the cloud[C]// 2010 Third International Conference on Software Testing, Verification, and Validation Workshops (ICSTW). IEEE, 2010: 434-437.
- [27] PARVEEN T, TILLEY S, DALEY N, et al. Towards a distributed execution framework for JUnit test cases[C]// IEEE International Conference on Software Maintenance, 2009 (ICSM 2009). IEEE, 2009: 425-428.
- [28] HANAWA T, BANZAI T, KOIZUMI H, et al. Large-Scale Software Testing Environment Using Cloud Computing Technology for Dependable Parallel and Distributed Systems[C]// Third International Conference on Software Testing, Verification, and Validation Workshops. IEEE Computer Society, 2010: 428-433.
- [29] TSAI W T, COLBOURN C J, LUO J, et al. Test algebra for combinatorial testing[C]// 2013 8th International Workshop on Automation of Software Test (AST). IEEE, 2013: 19-25.
- [30] Cloud Testing [EB/OL]. <http://www.CloudTesting.com>.
- [31] IBM. Smart business test cloud [EB/OL]. <http://www-935.ibm.com/service/us/index.wss/offering.midware/a1030965>.
- [32] Baidu. MTC [EB/OL]. <http://mtc.baidu.com>.
- [33] Testin. [EB/OL]. <http://www.testin.cn/portal.action?op=Portal.index>.
- [34] COTRONEO D, FRATTINI F, PIETRANTUONO R, et al. State-based robustness testing of IaaS cloud platforms[C]// Proceedings of the 5th International Workshop on Cloud Data and Platforms. ACM, 2015.
- [35] FAGHIR F, BAZARBAYEV S, OVERHOLT M, et al. Failure

- scenario as a service (FSaaS) for hadoop clusters[C]//Proceedings of the Workshop on Secure and Dependable Middleware for Cloud Monitoring and Management. ACM, 2012.
- [36] GUNAWI H S, DO T, JOSHI P, et al. FATE and DESTINI: A Framework for Cloud Recovery Testing[C]//NSDI. 2011.
- [37] JOSHI P, GUNAWI H S, SEN K. PREFAIL: A programmable tool for multiple-failure injection[J]. ACM SIGPLAN Notices, 2011, 46(10): 171-188.
- [38] BALDUZZI M, ZADDACH J, BALZAROTTI D, et al. A security analysis of amazon's elastic compute cloud service[C]//Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on Applied Computing. ACM, 2012: 1427-1434.
- [39] YIGITBASI N, IOSUP A, EPEMA D, et al. C-meter: A framework for performance analysis of computing clouds[C]//Proceedings of the 2009 9th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid. IEEE Computer Society, 2009: 472-477.
- [40] MOLDOVAN D, COPIL G, TRUONG H L, et al. Mela: Monitoring and analyzing elasticity of cloud services[C]//2013 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). IEEE, 2013: 80-87.
- [41] COPIL G, TRIHINAS D, TRUONG H L, et al. ADVISE-a Framework for Evaluating Cloud Service Elasticity Behavior[M]//Service-Oriented Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 275-290.
- [42] GAMBI A, HUMMER W, DUSTDAR S. Automated testing of cloud-based elastic systems with AUTOCLES[C]//2013 IEEE/ACM 28th International Conference on Automated Software Engineering (ASE). IEEE, 2013: 714-717.
- [43] ANTONIOU A. Performance evaluation of cloud infrastructure using complex workloads[D]. TU Delft, Delft University of Technology, 2012.
- [44] SCHOUTEN E. Rapid Elasticity and the Cloud, September 2012[EB/OL]. <http://thoughtsoncloud.com/index.php/2012/09/rapid-elasticity-and-the-cloud>.
- [45] MODEL O M U. Compute Infrastructure as a Service[R]. Tech. rep., Open Data Center Alliance (OCDA), 2012. http://www.opendatacenteralliance.org/docs/ODCA_Compute_IaaS_Master_UM_v1.0_Nov2012.pdf.
- [46] COHEN R. Defining elastic computing, September 2009[OL]. <http://www.elasticvapor.com/2009/09/defining-elastic-computing.html>, 2013.
- [47] HERBST N R, KOUNEV S, REUSSNER R. Elasticity in Cloud Computing, What It Is, and What It Is Not[C]//ICAC. 2013: 23-27.
- [48] AISOPOS F, TSERPES K, VARVARIGOU T. Resource management in software as a service using the knapsack problem model[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 141(2): 465-477.
- [49] LI M, YE F, KIM M, et al. A scalable and elastic publish/subscribe service[C]//2011 IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS). IEEE, 2011: 1254-1265.
- [50] PEREZ-SORROSAL F, PATIÑO-MARTINEZ M, JIMENEZ-PERIS R, et al. Elastic SI-Cache: consistent and scalable caching in multi-tier architectures[J]. The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases, 2011, 20(6): 841-865.
- [51] HAN R, GHAMEN M M, GUO L, et al. Enabling cost-aware and adaptive elasticity of multi-tier cloud applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2014, 32: 82-98.
- [52] GALANTE G, DE BONA L C E. A survey on cloud computing elasticity[C]//2012 IEEE Fifth International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC). IEEE, 2012: 263-270.
- [53] AGRAWAL D, EL ABBADI A, DAS S, et al. Database scalability, elasticity, and autonomy in the cloud[C]//Database Systems for Advanced Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 2-15.
- [54] DAS S. Scalable and elastic transactional data stores for cloud computing platforms[D]. University of California Santa Barbara, 2011.
- [55] Vaquero L M, Rodero-Merino L, Buyya R. Dynamically scaling applications in the cloud[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(1): 45-52.
- [56] COUTINHO E F, SOUSA F R D C, REGO P A L, et al. Elasticity in cloud computing: a survey[J]. Annals of Telecommunications, 2015, 70(7): 289-309.
- [57] LIM H C, BABU S, CHASE J S, et al. Automated control in cloud computing: challenges and opportunities[C]//Proceedings of the 1st Workshop on Automated Control for Datacenters and Clouds. ACM, 2009: 13-18.
- [58] MENG S, LIU L, SOUNDARARAJAN V. Tide: achieving self-scaling in virtualized datacenter management middleware[C]//Proceedings of the 11th International Middleware Conference Industrial track. ACM, 2010: 17-22.
- [59] CALHEIROS R N, VECCHIOLA C, KARUNAMOORTHY D, et al. The Aneka platform and QoS-driven resource provisioning for elastic applications on hybrid Clouds[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(6): 861-870.
- [60] FITÓ J O, GOIRI I, GUITART J. SLA-driven elastic cloud hosting provider[C]//2010 18th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP). IEEE, 2010: 111-118.
- [61] MARSHALL P, KEAHEY K, FREEMAN T. Elastic site: Using clouds to elastically extend site resources[C]//Proceedings of the 2010 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing. IEEE Computer Society, 2010: 43-52.
- [62] DAWOUD W, TAKOUNA I, MEINEL C. Elastic vm for cloud resources provisioning optimization[M]//Advances in Computing and Communications. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 431-445.
- [63] DAWOUD W, TAKOUNA I, MEINEL C. Elastic VM for Cloud Resources Provisioning Optimization[C]//Advances in Computing and Communications—First International Conference (Acc 2011). Kochi, India, DBLP, 2011: 431-445.
- [64] GONG Z, GU X, WILKES J. Press: Predictive elastic resource scaling for cloud systems[C]//2010 International Conference on Network and Service Management (CNSM). IEEE, 2010: 9-16.
- [65] SHEN Z M, SUBBIAH S, GU X H, et al. Cloud Scale: Elastic Resource Scaling for Multi-tenant Cloud Systems[C]//Proc. of the 2nd ACM Symposium on Cloud Computing. New York,

- USA: ACM Press, 2011:1353-1355.
- [66] SHARMA U, SHENOY P, SAHU S, et al. A cost-aware elasticity provisioning system for the cloud[C]//2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2011:559-570.
- [67] KNAUTH T, FETZER C. Scaling non-elastic applications using virtual machines[C]//2011 IEEE International Conference on Cloud Computing (CLOUD). IEEE, 2011:468-475.
- [68] HERBST N R. Quantifying the Impact of Platform Configuration Space for Elasticity Benchmarking[D]. Informatics Institute, 2011.
- [69] WEBER A, HERBST N, GROENDA H, et al. Towards a Resource Elasticity Benchmark for Cloud Environments[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Hot Topics in Cloud service Scalability. ACM, 2014.
- [70] HERBST N R, KOUNEV S, WEBER A, et al. BUNGEE: An Elasticity Benchmark for Self-Adaptive IaaS Cloud Environments[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2015). 2015.
- [71] LI Z, O'BRIEN L, ZHANG H, et al. On a catalogue of metrics for evaluating commercial cloud services[C]//Proceedings of the 2012 ACM/IEEE 13th International Conference on Grid Computing. IEEE Computer Society, 2012:164-173.
- [72] FERREIRA COUTINHO E, GONCALVES GOMES D, NEUMAN DE SOUZA J. An analysis of elasticity in cloud computing environments based on allocation time and resources[C]//2nd IEEE Latin American Conference on Cloud Computing and Communications (LatinCloud). IEEE, 2013:7-12.
- [73] SHAWKY D M, ALI A F. Defining a measure of cloud computing elasticity[C]//2012 1st International Conference on Systems and Computer Science (ICSCS). IEEE, 2012:1-5.
- [74] BREBNER P C. Is your cloud elastic enough?: performance modelling the elasticity of infrastructure as a service (iaas) cloud applications[C]//Proceedings of the 3rd ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering. ACM, 2012:263-266.
- [75] BERSANI M M, BIANCULLI D, DUSTDAR S, et al. Towards the formalization of properties of cloud-based elastic systems[C]//Proceedings of the 6th International Workshop on Principles of Engineering Service-Oriented and Cloud Systems. ACM, 2014:38-47.
- [76] FOLKERTS E, ALEXANDROV A, SACHS K, et al. Benchmarking in the cloud: What it should, can, and cannot be[M]//Selected Topics in Performance Evaluation and Benchmarking. Springer Berlin Heidelberg, 2013:173-188.
- [77] SULEIMAN B. Elasticity economics of cloud-based applications[C]//2012 IEEE Ninth International Conference on Services Computing (SCC). IEEE, 2012:694-695.
- [78] ISLAM S, LEE K, FEKETE A, et al. How a consumer can measure elasticity for cloud platforms[C]//Proceedings of the 3rd ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering. ACM, 2012:85-96.
- [79] TINNEFELD C, TASCHIK D, PLATTNER H. Quantifying the elasticity of a database management system[C]//DBKDA 2014, The Sixth International Conference on Advances in Databases, Knowledge, and Data Applications. 2014:125-131.
- [80] MOLDOVAN D, COPIL G, TRUONG H L, et al. On Analyzing Elasticity Relationships of Cloud Services[C]//2014 IEEE 6th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). IEEE, 2014:447-454.
- [81] SHARMA U. Elastic resource management in cloud computing platforms[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2013:1-175.
- [82] JOGALEKAR P, WOODSIDE M. Evaluating the scalability of distributed systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2000, 11(6):589-603.
- [83] JMeter [EB/OL]. <http://jakarta.apache.org/jmeter>.
- [84] Faban [EB/OL]. <http://java.net/projects/faban>.
- [85] Siege [EB/OL]. <http://www.joedog.org/siege-home>.
- [86] MENASCÉ D A. TPC-W: A benchmark for e-commerce[J]. IEEE Internet Computing, 2002, 6(3):83-87.
- [87] Amazon Cloudwatch [EB/OL]. <http://aws.amazon.com/cn/cloudwatch>.
- [88] Yahoo Chukwa [EB/OL]. <http://chuka.apache.org>.
- [89] Ganglia [EB/OL]. <http://ganglia.info>.
- [90] Nagios [EB/OL]. <http://www.nagios.org>.
- [91] Grenchmark [EB/OL]. <http://grenchmark.st.ewi.tudelft.nl>.
- [92] NAJJAR A, SERPAGGI X, GRAVIER C, et al. Survey of elasticity management solutions in cloud computing[M]//Continued Rise of the Cloud. Springer London, 2014:235-263
- (上接第7页)
- [73] GÜBDOĞAN M, LEDINGHAM P M, Almasi A, et al. Quantum Storage of a Photonic Polarization Qubit in a Solid [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(19):1905041-1905045.
- [74] ZHOU Z Q, LING W B, YANG M, et al. Realization of Reliable Solid-State Quantum Memory for Photonic Polarization Qubit [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(19):190505-190507.
- [75] PENG C Z, YANG T, BAO X H, et al. Experimental Free-Space Distribution of Entangled Photon Pairs Over 13 Km: Towards Satellite-Based Global Quantum Communication [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15):150501-150504.
- [76] JIN X M, REN J G, YABG B, et al. Experimental Free-Space Quantum Teleportation [J]. Nature Photon, 2010, 4(6):376-381.
- [77] YIN J, REB J G, LU H, et al. Quantum Teleportation and Entanglement Distribution Over 100-kilometre Free-Space Channels [J]. Nature, 2012, 488(7410):185-188.
- [78] ZHAO Z, CHEN Y A, ZHANG A N, et al. Experimental Demonstration of Five-Photon Entanglement and Open-Destination Teleportation [J]. Nature, 2004, 430(6995):54-58.
- [79] ZHANG Q, GOEBEL A, WAGENKNECHT C, et al. Experimental Quantum Teleportation of a Two-Qubit Composite System [J]. Nature Physics, 2006, 2(10):678-682.
- [80] WANG X L, CAI X D, SU Z, et al. Quantum Teleportation of Multiple Degrees of Freedom of a Single Photon [J]. Nature, 2015, 518(7540):516-519.