

## 云环境下服务信任感知的可信动态级调度方法

曹洁<sup>1,2</sup>, 曾国荪<sup>1,2</sup>, 姜火文<sup>1,2</sup>, 马海英<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学 计算机科学与技术系, 上海 200092; 2. 国家高性能计算机工程技术中心同济分中心, 上海 200092;  
3. 南通大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南通 226019)

**摘 要:** 以社会学中的人际关系信任模型为基础, 提出了一种基于服务消费者的服务满意度评价、推荐者的服务推荐和第三方服务性能反馈的可信度量模型。将用户对服务资源的信任需求和服务资源的可信度并入 DLS 算法得到可信动态级调度算法 CTDLS, 从而在计算调度级别时考虑服务资源的可信程度。模拟实验表明, 该算法能有效满足任务在信任方面的服务质量需求, 对提高任务调度的成功率具有实际意义。

**关键词:** 云计算; 服务可信; 信任评估; 并行任务; CTDLS 算法

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)11-0039-11

## Trust-aware dynamic level scheduling algorithm in cloud environment

CAO Jie<sup>1,2</sup>, ZENG Guo-sun<sup>1,2</sup>, JIANG Huo-wen<sup>1,2</sup>, MA Hai-ying<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Tongji Branch, National Engineering & Technology Center of High Performance Computer, Shanghai 200092, China;  
3. College of Computer Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Based on interpersonal trust model in sociology, a trust evaluation model is proposed based on users' past experience with service provider, friends' recommendations and third party's feedback. By combining users' trust requirement for service resource together with trust degree of service resource and dynamic level scheduling(DLS) algorithm, a novel scheduling algorithm was proposed that was called trust-aware dynamic level scheduling algorithm in cloud environment(CTDLS).The algorithm takes the cloud service resources' trust degree into account when calculates the scheduling-level of task-resource pairs. The simulation experimental results show that such algorithms can effectively satisfy the tasks' trust requirement and improve the success rate of parallel tasks scheduling in practice.

**Key words:** cloud computing; service trust; trust evaluation; parallel task; CTDLS algorithm

### 1 引言

云计算的发展使有效利用大范围内分布的资源来完成以往根本无法完成的应用成为可能。在云

环境下, 数据分散在不同的数据中心, 服务应用位于远程服务器中。云端技术将分散的数据和远程应用以虚拟化的形式呈现在用户的电脑中。不管用户在什么位置、在什么时间都可以用云环境下的计算

收稿日期: 2014-08-11; 修回日期: 2014-11-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)基金资助项目(2009AA012201); 国家自然科学基金资助项目(61272107, 61202173, 61103068, 61402244); 上海市优秀学科带头人计划基金资助项目(10XD1404400); 华为创新研究计划基金资助项目(IRP-2013-12-03); 高效能服务器和存储技术国家重点实验室开放基金资助项目(2014HSSA10); 南通市科技计划基金资助项目(BK2013050); 江西省教育厅科技计划基金资助项目(GJJ13569)

**Foundation Items:** The National High-Tech Research and Development Program of China (863 Program)(2009AA012201); The National Natural Science Foundation of China (61272107, 61202173, 61103068, 61402244);The Program of Shanghai Subject Chief Scientist (10XD1404400); The Huawei Innovation Research Project (IRP-2013-12-03); The State Key Laboratory of High-end Server & Storage Technology(2014HSSA10);The Science and Technology Project of Nantong (K2013050); The Project of Science & Technology Plan by Education Administration Department of Jiangxi Province (GJJ13569)

和存储设施。云计算越来越受欢迎,很多公司将他们的业务迁移到云中,可伸缩、可靠和成本效益地访问高端的资源,而这些资源他们购买不起。

在云计算中,服务提供者向服务消费者提供 3 种形式的服务,即基础设施即服务(IaaS, infrastructure as a service),平台即服务(PaaS, platform as a service),软件即服务(SaaS, software as a service)。IaaS 允许消费者从服务提供者那里租用基础设施资源,如特定计算能力和存储能力的物理机。PaaS 允许消费者租用具有特定操作系统和开发环境的处理机。SaaS 允许消费者按使用付费的方式访问各种软件,即各种应用。在云计算环境中,由于资源的异构性、分布性、开放性、不确定性、动态性、欺骗性等特点,使可信问题成为当前云计算的挑战问题之一,以往通过产品叠加式的“被动防御”已经远远不够,需要研究服务实体提供服务的可信性,迫切需要建立准确、高效、动态可信度量模型对云计算中的服务实体的可信性进行度量。

用户对于服务的信任,是其在参与或者使用服务的过程中所形成的一种主观感受<sup>[1]</sup>。但是,人们的主观感受很难被客观地描述和获取,对同一服务的不同使用者,由于自身对服务评价的标准不同,导致用户对服务可信度的评价也不相同。服务资源的可信度是资源满足用户的主观预期,而用户对服务的可信评价是用户对于服务行为是否符合预期的一种打分,因此,评价价值的高低可以较好地反映用户使用服务的主观感受。信任的度量是非常复杂的,信任可能是主观的也可能是客观的,它可能是基于服务的信誉,也可能基于其他服务提供者的推荐。此外,在云环境下,服务资源动态变化、自治性强、安全难控,用户要想获得理想的服务存在不少困难。这是因为:1) 云计算环境下虽然存在大量功能相同或相似、服务质量 QoS 各异的云服务,但网络中服务消费者或服务提供者所宣称的 QoS 属性难以鉴别,用户选择的有效性受到限制<sup>[2]</sup>; 2) 缺乏公正且可操作的评价机制,当前评价主要来自于使用者对服务的评价,而使用者反馈的质量信息又具有不同的可信值,例如宽容与苛刻的使用者对同一服务的评价结果将不同; 3) 仅考虑服务消费者对服务提供者的直接信任值和服务推荐者的推荐信任值,还不足以真实地评价服务的可信性,缺乏独立第三方对服务的实际服务性能的客观评价。

因此,如何建立可信的服务评价机制,使高服

务质量的服务能获得较高的信任评价,快速高效地为有可信需求的服务请求分配服务资源,已成为云计算快速发展的关键需求。本文通过熵权的方法确定服务资源的各服务指标的客观服务权重,将其与主观赋权结合起来,以组合成服务指标的综合权重,以便较为真实地评价服务资源的服务满意度,从而进一步得出服务消费者对服务资源的直接信任度。本文利用推荐者对服务资源的各服务指标的权重与消费者对推荐者各服务指标的权重之间的相似程度、推荐者对提供者直接信任度的大小和消费者对推荐者的直接信任度的大小,来评价服务资源被推荐的信任度大小。另外,引入独立第三方来监控服务提供者的实际服务性能,对服务的实际服务性能进行 QoS 反馈信任度计算,弥补以往服务可信评价时仅利用主观信任度和推荐信任度的不足。将 3 个方面的可信度进行综合得出每个服务提供者的综合可信度。调度并行任务时,在动态级调度算法 DLS 的基础上,给出考虑任务可信需求的云计算环境下的可信动态级调度算法 CTDLS,实验结果表明该算法能有效提高任务的平均执行成功率、降低任务的平均调度长度。

## 2 相关工作

在云计算环境下,资源具有自治性、异构性、动态性、分布性等特性,使资源的调度具有更大的挑战,需要额外考虑资源可能遭遇的失效,资源是否可信,资源是否满足用户的 QoS 需求。如果忽略了服务资源的可信性问题,那么服务提供者的恶意行为将对有截至时间和可信需求的服务请求的完成产生巨大影响,因此,服务资源的管理与用户服务请求的调度必须既要考虑服务资源的服务性能,也必须关注用户的可信需求。由于任务分配与调度通常是 NP 难题,一般情况下不能够在多项式时间内找到问题的最优解。因此,研究者一般采用启发式方法来获得一个较优解,形成了表调度方法<sup>[3]</sup>、基于分簇的调度方法、基于任务复制的调度方法、有指导地随机搜索调度方法等类型。

对于服务资源的信任管理和可信调度问题,国内外学者进行了大量的研究。Azzedin 将 QoS 和信任等资源属性引入网络任务调度,从而为安全、有效地利用分布的网络资源提供支持<sup>[4]</sup>。文献[5]将风险评估引入到可信度计算中,提出了适用于普适计算网络环境下基于可信度的安全服务发现模型。Li

等<sup>[6]</sup>从最近信任、历史信任、期望信任等方面来决定一个服务实体的信任值。文献[7]重点考虑可靠性和可用性 2 个因素, 提出了一种适用于网格环境下的可信度量模型, 该模型具有较好的可扩展性。Sarbjee<sup>[8]</sup>基于云用户过去被服务的过往经历和第三方的服务推荐, 提出一种信任评估机制以计算一个服务提供者的信任值。王守信等<sup>[9]</sup>在信任云的基础上, 提出一种基于云模型的主观信任量化评价方法, 使用主观信任云的期望和超熵对信任客体信用度进行定量评价。Anupam 等<sup>[10]</sup>提出一种动态信任计算模型 SecuredTrust, 分析了和信任评估相关的各种因素, 能有效地对恶意 Agent 的震荡行为做出反应, 有效解决了恶意 Agent 的策略表现行为的信任评估问题。Abawajy<sup>[11]</sup>提出一种基于声誉的分布式信任管理系统, 在该框架中有关各方共同决定云计算实体的信任值, 信任被认为是 2 个对等实体之间的信任关系, 声誉管理者利用个人经历、声誉等级和诚实信誉等级来决定一个服务实体的声誉值。Wang 等<sup>[12]</sup>针对当前信任评估通常基于概率或模糊集理论, 对不确定性重视不足的问题, 提出一种新的量化主观信任评估的方法, 主观信任通过云模型来建模, 实验结果表明该方法能有效支持主观信任决策。王刚等<sup>[13]</sup>针对不同服务中评价指标权重难以客观确定的问题, 提出基于熵权的指标权重确定方法, 并利用 TOPSIS 方法来选择合适的网络交易节点以避免交易节点选取的随意性。田春岐等<sup>[14]</sup>针对对等网中节点之间由于兴趣爱好差异大、相互发生重复交易的可能性较小, 从而难以有效建立信任关系的现状, 提出一种新的基于超级节点的 P2P 网络信任模型。邓晓衡等<sup>[15]</sup>在基于 Internet 的虚拟计算环境的资源共享的用户与资源关于身份可信、能力可信、行为可信的信任模型的基础上, 提出了一种可信优化的资源调度算法。胡建理等<sup>[16]</sup>借鉴人际网络中的信任关系, 提出了一种基于节点反馈可信度的分布式 P2P 全局信任模型, 用于量化和评估节点的可信程度, 并给出了模型的数学表述和分布式实现方法。在信任监控方面, 张琳等<sup>[17]</sup>提出了一种支持行为的可用于信息服务的动态信任监控模型, 并基于重要性等级因子、行为属性因子、时差间隔因子和频次处罚因子 4 种因素设计了一种细粒度的支持行为的信任更新算法。李小勇等<sup>[18]</sup>提出了基于行为监控的自适应动态信任度测模型, 将粗糙集理论和信息熵理论结合起来, 应用于开放环境下动态构

建基于行为数据监控与分析的信任关系度测模型。

### 3 服务信任定义和调度模型及假设

#### 3.1 服务信任的定义

在社会学中, 当人们说信任某人或某人值得信任时, 隐含的意思是: 他采取一种对人们有利或至少无害行动的概率很高, 足以使人们考虑与他进行某种形式的合作。本文借用社会学中的信任概念来说明云计算中的服务信任, 具体定义如下。

**定义 1** 服务信任: 在云计算特定上下文环境下, 在某时刻云计算服务提供者被认为可以可靠、安全、值得信赖地提供其所宣称的服务性能的一种信念。

**定义 2** 信任关系: 在云计算环境下, 假定服务资源代理集  $B = \{1 \leq k \leq n\}$ ,  $n$  为资源代理的数目;  $b_k$  所代理的服务资源集  $br_k = \{br_{kj} | 1 \leq j \leq m\}$ ,  $m$  为  $b_k$  所代理的资源数; 服务消费者  $sc_i \in br_k$  与服务提供者  $sp_j \in br_k$  之间的信任关系可抽象为一个六元组  $Trust_{ij} = (br_k, sc_i, sp_j, td_{ij}, c_{ij}, t_{ij})$ 。

其中,  $br_k$  是云计算环境中的服务资源代理者  $b_k$  所代理的服务资源集;  $td_{ij}$  是服务消费者  $sc_i$  相信服务提供者  $sp_j$  的信任度, 信任关系的量化形式, 用 0 到 1 之间的数值来表示, 值越大信任度越大;  $c_{ij}$  是信任在服务消费者  $sc_i$  与服务提供者  $sp_j$  之间发生的上下文环境, 即服务提供时的上下文, 如电子商务交易环境、文件下载环境等;  $t_{ij}$  是时间戳, 即服务消费者  $sc_i$  对服务提供者  $sp_j$  进行信任评估的时间。

#### 3.2 服务信任感知的云计算调度模型

图 1 给出了本文的服务信任感知的服务请求调度架构。服务信任评估模块用来接收用户使用服务资源后对服务资源所提供的服务信任反馈, 同时该模块也接收服务资源代理对服务资源性能的监控情况, 即服务资源的 QoS 信任反馈。服务请求调度器模块根据服务信任评估模块对服务资源的信任评估结果、服务请求对服务资源的信任度要求以及服务级水平 SLA 的要求, 按照某种调度策略将服务请求调度到相应的服务资源上。

#### 3.3 服务信任感知调度的基本假设

在云环境下每个资源既是服务请求者也是服务提供者, 即每个资源既可向其他服务资源请求服务, 也可向其他服务资源提供服务。本文假定一个服务资源只有一个服务代理者, 即用户的服务请求通过服务代理者获得所需要的服务资源。

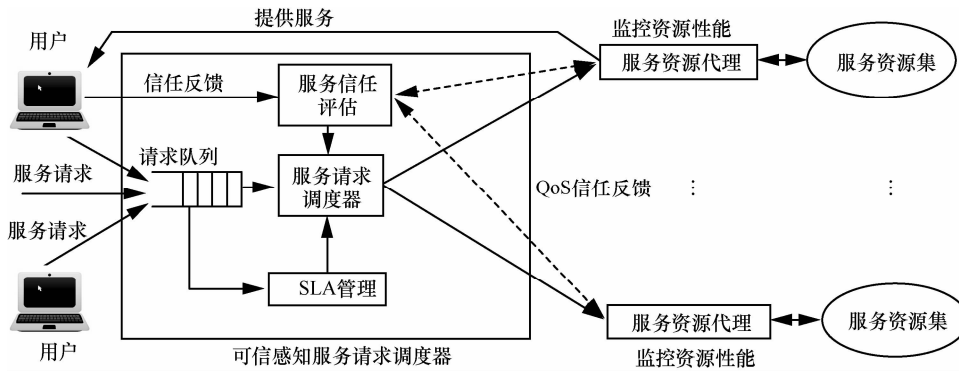


图 1 服务信任感知的云计算调度架构

服务消费者、服务推荐者和提供者是云计算中的服务资源在不同应用上下文下的不同称呼。服务资源的信任度与服务资源所提供的服务信任度概念等同。

#### 4 服务资源的综合信任度计算

本文从 3 个方面来综合评估云计算服务资源的信任度：1) 服务消费者根据自己与服务提供者在过去所进行的服务交易情况，对服务提供者进行直接信任度  $T^d$  评估；2) 其他服务消费者（也称服务推荐者）向服务消费者推荐该服务资源的推荐信任度  $T^r$ ；3) 第三方机构对服务资源的实际服务性能进行监控，提供反应服务资源服务能力的反馈信任度  $T^f$ 。

##### 4.1 直接信任度 $T^d$ 的计算

服务消费者对过去所进行的服务交易满意程度是判断服务提供者可信度大小的最直接、显明的指标。服务消费者对服务提供者是否满意，是通过服务的评价指标综合而得到的。在云计算中，实际应用类型非常多，因而服务的评价指标也多。从服务消费者的角度选取与服务消费者切身利益最相关的服务成功率  $S_s$ 、服务功能满意率  $S_f$ 、服务成本满意率  $S_c$ 、服务时间满意率  $S_t$ 、响应时间可接受率  $S_r$  等方面来综合评价服务的满意度。此外，交易服务类型、交易金额、交易环境等也是影响服务可信的重要因素。为了减少维度多所造成的计算量大以及简化问题的讨论，只选取前面 5 个服务消费者切身利益最相关的因素来论述本文的计算方法。

##### 4.1.1 服务指标权重的确定

服务消费者在决定服务的满意度时，上述各指标的权重一般不相同，本文采用基于熵权的客观的确定方法和主观赋权的主观方法来共同决定指标

的权重。熵是来自热力学的一个概念，在哲学和统计物理中熵被解释为物质系统带来的混乱和无序程度。在信息论中，熵被认为是信息源状态的不确定程度。因而，运用信息熵评价所获系统信息的有序程度及信息的效用值是很自然的。

假设已经获得服务消费者  $m$  次服务交易的上述 5 个评价指标的样本数据矩阵  $\mathbf{X} = \{x_{ij}\}_{m \times 5}$ ，由于各指标的量纲、数量级及指标优劣的取向均有很大差异，故需对初始数据做无量纲标准化处理。对于正向递增的具体值，如服务成功率、服务满意率等值，服务消费者期望它们越大越好，可以通过  $y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ik}\}}{\max\{x_{ik}\} - \min\{x_{ik}\}}$  把它转化为 [0,1] 范围内的正向递增值，其中  $\max\{x_{ik}\}$  和  $\min\{x_{ik}\}$  分别表示该指标中的最大值和最小值。对于正向递减的具体值可以通过  $y_{ij} = \frac{\max\{x_{ik}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ik}\} - \min\{x_{ik}\}}$ ，把它转化为 [0,1] 范围内的正向递增值。通过前面的转换，所有指标都表示形式都转换为 [0,1] 范围内的正向递增值，这样每个指标值都希望越大越好。设无量纲化处理后的标准化矩阵为  $\mathbf{Y} = \{y_{ij}\}_{m \times 5}$ 。则各项指标的信息熵值为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, j=1,2,\dots,5$$

其中，常数  $k$  与系统的样本数  $m$  有关，对于一个信息完全无序的系统，有序度为零，其熵值最大， $e=1$ 。 $m$  个样本处于完全无序分布状态时， $y_{ij} = 1/m$ ，则

$$e = -k \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \ln \frac{1}{m} = k \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \ln m = k \ln m = 1$$

于是得到  $k = (\ln m)^{-1}$ ， $0 \leq e \leq 1$ 。

由于信息熵  $e_j$  可用来度量第  $j$  项指标信息的效用价值, 当完全无序时,  $e_j = 1$ 。此时,  $e_j$  的信息 (也就是  $j$  指标的数据) 对综合评价的效用价值为零。因此, 某项指标的信息效用价值取决于该指标的信息熵  $e_j$  与 1 的差值  $h_j$ :  $h_j = 1 - e_j$ 。利用熵值法估算各指标的权重, 其本质是利用该指标信息的效用价值来计算的, 其效用价值越高, 对评价的重要性就越大, 于是  $j$  指标的权重为

$$w_j = h_j / \sum_{j=1}^5 h_j, \quad j = 1, 2, \dots, 5$$

其中,  $0 \leq w_j \leq 1$ , 且  $\sum_{j=1}^5 w_j = 1$ 。

熵值法是根据各指标所含信息有序度的差异性, 也就是信息的效用价值来确定该指标的权重, 它是一种客观赋权的方法。具体到不同的服务消费者, 根据自身的个性偏好, 对各服务指标所选取的权重不同, 该权重确定方法称为主观赋权法。客观赋权法的原始数据来源于各指标的实际数据, 具有绝对的客观性, 但有时会因为所取样本数据不够充分, 最重要的分量不一定具有最大的权重, 最不重要的分量可能具有最大的权重。所以, 本文将主观赋权法和客观赋权法通过乘法结合起来, 以组合成服务指标的综合权重, 尽量避免 2 种方法的不足。设 2 种赋权法所确定的各服务指标的权值为  $w^k = (w_1^k, w_2^k, \dots, w_5^k)$ ,  $k = 1, 2$ , 则组合权值为

$$w_j = \frac{\prod_{k=1}^2 w_j^k}{\sum_{m=1}^5 \prod_{k=1}^2 w_m^k}$$

#### 4.1.2 直接信任度 $T_{ij}^{dt}$ 的计算

基于上一节所确定的各服务指标的权重, 则第  $i$  次服务交易的服务满意度  $f^s(i)$  可表示为

$$f^s(i) = \sum_{j=1}^5 w_j y_{ij}$$

直接信任度是服务消费者  $sc_i$  根据过去与服务提供者  $sp_j$  的直接交易情况所得到的信任值。下面给出直接信任度的定义。

**定义 3** 直接信任度: 在评价时间  $\tau$  ( $\tau$  视具体服务应用而定, 如 1 天、1 个月等) 内, 假设服务消费者  $sc_i$  和服务提供者  $sp_j$  之间的交易次数为  $m$ , 则服务消费者  $sc_i$  对服务提供者  $sp_j$  的直接信任度  $T_{ij}^{dt}$

定义为  $T_{ij}^{dt} = \frac{1 + \sum_{k=1}^m f_{ij}^s(k)}{m + \gamma}$ , 其中  $f_{ij}^s(k)$  表示服务消费者  $i$  对服务提供者  $j$  在第  $k$  次交易的服务满意度,  $m = 0$  时,  $T_{ij}^{dt} = 1/\gamma$ , 即没发生过服务交易的直接可信度设为  $1/\gamma$  ( $\gamma$  大于 1)。

从社会学中人与人交往建立信任的特点可知, 信任是动态变化的, 并具有时衰特性, 因此当服务消费者与服务提供者长时间没有交互时, 信任度会随时间而衰减。在时刻  $\tau$ , 经过  $t$  单位时间都没有发生交易, 直接信任度随时间推移衰减的计算式如下

$$T_{ij}^{dt}(\tau + t) = \begin{cases} T_{ij}^{dt}(\tau) & , T_{ij}^{dt}(\tau) \geq \theta_1, t \leq \theta_2 \\ T_{ij}^{dt}(\tau) e^{-\lambda(t-\theta_2)} & , T_{ij}^{dt}(\tau) \geq \theta_1, t > \theta_2 \\ b & , \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $\lambda$  是衰减常数, 用来控制信任值衰减的快慢,  $\lambda$  根据服务类型的不同设定不同的值。在交易次数没发生变化时, 并不是立即随时间推移降低可信度, 而是当过去的时间  $t > \theta_2$  时才衰减,  $\theta_2$  称为可信度开始衰减的时间阈值, 这符合社会中人与人的信任变化情况, 即人们对一个朋友的信任不会因为较短的时间内没有交互就立即降低信任值, 同时, 这样设置可降低信任更新的频率, 减少计算量。当直接信任度值降低之后小于  $\theta_1$  时, 将直接信任度值设为最小值  $b$ , 随时间的推移不再发生变化。

#### 4.2 推荐信任度 $T_{ij}^{rt}$ 的计算

服务推荐者向服务消费者推荐服务提供者时, 对服务消费者来说服务提供者被推荐的可信度与 3 个因素有关: 1) 推荐者对服务提供者各服务指标的权重和消费者对推荐者各服务指标的权重的相似程度, 服务指标的权重之间越相似, 说明他们对服务的各服务指标要求越相似, 推荐者的推荐越具有权威; 2) 推荐者对服务提供者直接信任度的大小, 直接信任度越大说明服务提供者的服务越可信; 3) 消费者对推荐者的直接信任度的大小, 直接信任度越大, 消费者越相信推荐者的推荐。

##### 4.2.1 服务资源的服务相似度计算

本文通过服务成功率  $Ss$ 、服务功能满意率  $Sf$ 、服务成本满意率  $Sc$ 、服务时间满意率  $St$ 、响应时间可接受率  $Sr$  5 个评价指标的权重的相似性, 评价推荐者对提供者的服务和消费者对推荐者的服务的相似度。

记服务推荐者  $sr_k$  对服务提供者  $sp_j$  服务的各服

务指标的权重向量为  $w_1 = (w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{15})$ , 服务消费者  $sc_i$  对服务推荐者  $sr_k$  各服务指标的权重向量为  $w_2 = (w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}, w_{25})$ 。本文用相关系数法来求解推荐者对提供者的服务指标的权重和消费者对推荐者服务指标的权重的相似程度  $Sim(sc_i, sr_k, sp_j)$ , 计算公式如下

$$Sim(sc_i, sr_k, sp_j) = \frac{\sum_{k=1}^5 |w_{1k} - \bar{w}_1| |w_{2k} - \bar{w}_2|}{\sqrt{\sum_{k=1}^5 [w_{1k} - \bar{w}_1]^2} \sqrt{\sum_{k=1}^5 [w_{2k} - \bar{w}_2]^2}}$$

其中,  $\bar{w}_1 = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 w_{1k}$ ,  $\bar{w}_2 = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 w_{2k}$ 。

#### 4.2.2 推荐可信度的计算

基于上述服务相似度的计算和影响服务提供者的推荐可信度的因素, 服务提供者  $sp_j$  被服务推荐者  $sr_k$  向服务消费者  $sc_i$  推荐的推荐可信度  $T^n(sc_i, sr_k, sp_j)$  的计算公式如下

$$T^n(sc_i, sr_k, sp_j) = Sim(sc_i, sr_k, sp_j) \cdot T^d(sc_i, sr_k) T^d(sr_k, sp_j)$$

令  $RSet(sc_i, sp_j)$  表示向服务消费者  $sc_i$  推荐服务提供者  $sp_j$  的服务推荐者集合,  $RSet(sc_i, sp_j)$  所含元素个数记为  $n$ , 服务提供者  $sp_j$  被推荐给服务消费者  $sc_i$  的推荐可信度  $T^n(sc_i, sp_j)$  表示为

$$T^n(sc_i, sp_j) = \frac{1}{n} \sum_{sr_k \in RSet(sc_i, sp_j)} T^n(sc_i, sr_k, sp_j)$$

### 4.3 QoS 反馈信任度 $T^n$ 的计算

服务提供者的能力可信是直接反映服务资源的 QoS 参数值是否能达到其承诺水平的一个重要因素, 首先必须在功能上满足服务请求者的服务需求。服务提供者的服务能力受 2 种类型的因素影响: 1) 自身的属性, 如计算速度、存储容量、系统的可用性等; 2) 与上下文环境相关的属性, 如传输带宽、网络延迟、网络抖动等。服务提供者所提供的服务类型不同, 对服务提供者的能力可信的参数要求也不同, 如计算密集型服务可能不考虑存储容量参数, 因为它对存储能力的要求比较低, 很容易得到满足; 存储密集型服务可能不考虑计算速度。无论服务侧重于什么样的能力可信, 服务提供者所实际表现出来的 QoS 参数为服务提供者的能力信任度评价提供依据。在这里, 选取服务可用性和服务完整性 2 个评价指标来反馈服务提供者的能力可

信度。

#### 4.3.1 服务可用性

服务可用性通俗含义是服务能被服务消费者可操作和可访问的程度。在软件工程中, 可用性依据平均故障间隔时间和平均修复时间来度量。云计算中服务资源的性能千差万别, 每个计算资源的计算能力、存储能力和 I/O 能力都存在差异, 则每个资源的可用性也不同。在现实中, 经常采用系统维护的手段来改善计算机系统的可用性。系统维护人员对出现故障的系统进行修理, 修复后的系统可继续执行其功能。由于马尔可夫型可修系统是实践中应用最多的一类可修系统, 因此, 本文假定每个计算资源都是具有马尔科夫性的。

本文假定每个服务资源只有工作和故障 2 种状态。服务资源的寿命  $X$  遵从参数为  $\lambda$  的指数分布  $P\{X \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}$ ,  $t \geq 0$ ,  $\lambda > 0$ 。服务资源故障后的修理时间  $Y$  遵从参数为  $\mu$  的指数分布  $P\{Y \leq t\} = 1 - e^{-\mu t}$ ,  $t \geq 0$ ,  $\mu > 0$ 。假定  $X$  和  $Y$  相互独立, 故障服务资源修复后的寿命分布与新的服务资源相同。若在初始的 0 时刻, 服务资源处于正常工作状态, 则服务资源  $r_i$  在时刻  $t$  的可用性为

$$AV(r_i, t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

若在初始的 0 时刻, 服务资源处于故障状态, 则服务资源  $r_i$  在时刻  $t$  的可用性为

$$AV(r_i, t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

#### 4.3.2 服务完整性

服务资源是否完整的完成了服务计算成为云计算日益迫切的问题。服务完整性主要由服务计算结果数据的数据精确度来体现<sup>[19]</sup>。之所以发生服务不完整, 可能由于网络延迟导致部分数据结果丢失、服务资源执行了粗粒度的不完全计算以及所采用的处理方法不能很好地适应服务请求导致计算不匹配。基于上述分析, 用服务请求得到完整服务的成功率来表示服务资源的服务完整性, 其定义如下。

**定义 4** 服务完整性: 在时间段  $t$  内, 令  $c_i$  表示被服务资源  $r_i$  成功完成的服务请求数,  $d_i$  表示被服务资源  $r_i$  完整完成的服务请求数, 服务资源  $r_i$  在时间段  $t$  内的服务完整性  $IN(r_i, t)$  定义为

$$IN(r_i, t) = \frac{d_i}{c_i}$$

### 4.3.3 QoS 反馈信任度 $T^f$ 的计算

QoS 反馈信任度  $T^f$  通过下述公式计算：

$T^f = w_{AV}AV(r_i, t) + w_{IN}IN(r_i, t)$ ，其中  $w_{AV}$ 、 $w_{IN}$  表示服务可用性和服务完整性在评估 QoS 反馈信任度时的权重，在不同的服务类型下，这些权重大小有所不同， $w_{AV} + w_{IN} = 1$ 。

### 4.4 综合信任度的计算

在评价一个服务资源的综合信任度时，根据不同的服务类型为直接信任度  $T^{dt}$ 、推荐信任度  $T^{rt}$  和 QoS 反馈信任度  $T^f$  3 个信任值设置不同的权重，设其分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ，且  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。令  $DSet(r_k)$  表示对服务资源  $r_k$  进行直接信任评估的服务资源集合，服务资源  $r_k$  的综合信任度  $CT(r_k)$  的计算式如下

$$CT(r_k) = \alpha \sum_{r_i \in DSet(r_k)} \frac{T^{dt}(r_i, r_k)}{|DSet(r_k)|} + \beta \sum_{r_i \in DSet(r_k)} \frac{T^{rt}(r_i, r_k)}{|DSet(r_k)|} + \gamma T^f$$

## 5 云计算环境下并行任务的可信动态级调度算法

### 5.1 并行任务的定义

云用户的需求多种多样，则所提交的云任务类型不尽相同。根据任务之间是否具有相关性，云任务可分为独立任务和并行任务 2 种。独立任务是由一个或多个子任务组成，子任务间无数据依赖先后关系。并行任务是由多个子任务组成，子任务间具有数据先后依赖关系，表现为一个子任务在没得到其他子任务的结果之前无法被处理，因而，独立任务可看做是并行任务的特殊形式。本文采用有向无环图(DAG, directed acyclic graph)表示一组具有相互依赖关系和数据交换的并行任务，定义如下。

**定义 5** 并行任务：一个有信任需求的并行任务可抽象表示为一个 DAG 图，即一个五元组  $DAG = (V, E, W, S, D)$ ，其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示任务的集合， $n$  表示任务的个数； $E = \{e_{ij} | v_i, v_j \in V\} \subseteq V \times V$ ，表示有向边的集合，即任务之间依赖关系的集合； $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  是节点计算负载量的集合， $w_i \in W$  表示节点  $v_i$  的串行计算量； $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  是节点信任服务质量因子的集合， $0 \leq s_i \in S \leq 1$ ， $s_i$  的值越大表示对资源的可信度要求越高； $d_{ij} \in D$  表示有向边  $e_{ij}$  两端点间需要传输的数据量。

### 5.2 并行任务的可信动态级调度算法

基于前面提到的云计算信任模型，本文对 DLS 调度算法<sup>[20]</sup>进行修改，以充分利用云服务资源的异构性降低并行任务的完成时间，同时满足并行任务各子任务对服务资源可信度的服务质量需求，使基于 DAG 的 DLS 并行任务调度变得更加合理。

DLS 算法是一个编译时的启发式表调度算法，用于有效分配基于 DAG 图的应用到一个异构资源机器集合上，从而减低应用执行的时间。在调度的每一步，如果通过计算得出就绪子任务  $v_i$  和空闲机器  $m_j$  相匹配的动态级别最高，则 DLS 算法将任务  $v_i$  调度到机器  $m_j$  上执行。为下文叙述方便，本文把机器、计算资源和服务资源概念上等同。一个任务机器对  $(v_i, m_j)$  的动态级  $DL(v_i, m_j)$  定义为

$$DL(v_i, m_j) = SL(v_i) - \max\{t_{i,j}^A, t_j^M\} + \Delta(v_i, m_j)$$

其中， $SL(v_i)$  为任务静态级，表示任务  $v_i$  到并行任务出口所有可达路径上的所有任务的平均计算时间和最大值，暗示了任务节点在执行优先层次上的重要性； $\max\{t_{i,j}^A, t_j^M\}$  表示任务  $v_i$  在机器  $m_j$  开始执行的时刻，反映了机器和通信资源的可用性，惩罚产生大的通信成本的任务节点对，其中， $t_{i,j}^A$  表示当任务  $v_i$  调度到机器  $m_j$  上时，所需的输入数据可获得的时刻， $t_j^M$  表示机器  $m_j$  空闲从而可用于执行任务  $v_i$  的时刻； $\Delta(v_i, m_j) = t_i^E - t_{i,j}^E$ ，反映了机器计算性能，为处理速度较快的机器增加优先级，为处理速度较慢的机器减少优先级，其中  $t_i^E$  表示任务  $v_i$  在所有机器上执行所需时间的平均值， $t_{i,j}^E$  表示任务  $v_i$  在机器  $m_j$  上执行所需要的时间。

DLS 算法当作出调度决策时，考虑了机器的异构，这能有效适应云计算环境下资源的异构性特征，但没有考虑云计算系统中计算资源的可信度。当任务调度到目标计算资源上执行时，计算资源的可信度反映了计算资源提供服务的可信程度。为了充分考虑计算资源的信任度，本文在 DLS 算法的基础上，提出云计算环境下的可信动态级调度算法 CTDLS (trust-dynamic level scheduling algorithm in cloud environment)，其可信动态级的定义如下

$$TDL(v_i, m_j) = [T(v_i, m_j)]^{\frac{a_i}{\max\{a_k\}}} (SL(v_i) - \max\{t_{i,j}^A, t_j^M\} + \Delta(v_i, m_j))$$

其中,  $T(v_i, m_j)$  表示把子任务  $v_i$  调度到计算资源  $m_j$  上运行时计算资源的信任度;  $a_i$  表示子任务  $v_i$  对信任的服务质量因子,  $\max\{a_k\}$  表示并行任务的所有子任务的服务质量因子的最大值。对于任务—计算资源对  $(v_i, m_j)$ , 当  $a_i$  增大时, 即任务  $v_i$  对云计算服务资源的信任程度要求增大时, 其调度级别就相应下降。所以, 本文提出的云计算环境下可信动态级调度算法具有很强的灵活性, 根据各子任务对可信度的不同需求, 设置相匹配的  $a_i$ , 从而满足服务消费者对服务信任的不同需求。

下面给出云计算环境下的可信动态级调度算法 CTDLS 的伪代码。

**算法 1** 云计算环境下的可信动态级调度算法 CTDLS()

输入: 任务图  $DAG = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 图云计算资源 Cloud, 资源间的信任关系矩阵  $TR$   
输出: 子任务资源分配序列  $Assign = \{(v_i, r_j)\}$

CTDLS()

{ for each  $r_k \in \text{Cloud}$  /\*计算每个资源的综合信任度\*/

{  $DT[] = \text{CountDT}(\text{Cloud}, TR)$ ; /\*计算每个计算资源的直接信任度\*/

$RT[] = \text{CountRT}(\text{Cloud}, TR)$ ; /\*计算每个计算资源的推荐信任度\*/

$FT[] = \text{CountFT}(\text{Cloud})$ ; /\*计算每个计算资源的反馈信任度\*/

$CT[] = \text{CountCT}(DT[], RT[], FT[])$ ; /\*计算每个计算资源的综合信任度\*/

/\* for each  $r_k \in \text{Cloud}$  \*/

$TDL[] = \text{CountTDL}(CT[], DAG)$ ; /\*计算每个子任务的可信动态级\*/

$L \leftarrow \{v_i | \text{indegree}(v_i) = 0, 1 \leq i \leq n\}$ ; /\* DAG

图中, 入度为零的子任务进入子任务准备队列 L\*/

$Assign \leftarrow \Phi$ ; /\*子任务资源分配序列\*/

$\varepsilon \leftarrow L$ ; /\*子任务执行队列初始化\*/

do until  $\varepsilon = \Phi$

{ for each  $v_i \in \varepsilon$

{  $(v_i, r_j) \leftarrow \text{select}(v_i, \text{Cloud}) \wedge \max\{TDL[v_i]$

$[r_j] | r_j \in \text{Cloud}\}$ ; /\*为任务  $v_i$  选择

使其可信动态级最大的计算资源\*/

$Assign \leftarrow Assign + \{(v_i, r_j)\}$ ;

$\varepsilon \leftarrow \varepsilon - \{v_i\}$ ;

for each immediate successor  $v_x$  of task  $v_i$   
{  $\text{indegree}(v_x) = \text{indegree}(v_x) - 1$ ;  
if  $\text{indegree}(v_x) = 0$

then  $\varepsilon \leftarrow \varepsilon + \{v_x\}$ ;

endif

/\* end for each immediate successor

$v_x$  of task  $v_i$  \*/

/\*end for each  $v_i \in \varepsilon$  \*/

/\*end do until  $\varepsilon = \Phi$  \*/

}

## 6 模拟实验及结果分析

下面通过模拟实验来测试本文所提出的云计算环境下的可信动态级调度算法 CTDLS 的效果。用云仿真软件 Cloudsim3.0<sup>[21]</sup>来进行模拟实验, CloudSim 是基于 Java 的离散事件模拟工具包, 支持云计算的资源管理和调度模拟。它侧重于模拟云计算环境中基本功能部件之间的行为, 支持用户创建自己的资源调度策略。仿真的过程不受机器性能的影响, 通过虚拟的时间和任务来模拟。用户可通过自己写文件来收集和分析数据以跟踪资源的利用情况和任务的完成情况。

CloudSim 模拟的主要流程如下: 按设置的参数初始化各个离散对象 → 启动仿真 → 资源注册 → 代理 broker 向信息中心查询资源 → 信任度的计算 → 按设定的调度策略为任务分配相匹配的资源 → 资源处理任务 → 任务执行完成 → 返回最终结果 → 结束仿真。采用 Java 语言编写仿真程序, 开发环境为基于 Java 的、开放源代码的可扩展集成开发平台 Eclipse。CloudSim3.0 模拟程序运行在 Intel 奔腾双核 E5800、3.2 GHz、1GB DDR3、Windows XP 专业版 32 位 SP3 操作系统的戴尔台式机上。

实验参数设置如下: 资源数和资源之间的链路数预先给定, 链路间传输速度介于 [2, 10] Mbit/s, 机器本身的初始可信度随机产生; 假定每个任务在每台机器上执行的时间介于 [20, 100] s 之间, 任务间传输的数据量根据任务的通信/计算比 (CCR) 来决定, 任务与其后继任务之间的通信时间是其执行时间的 CCR 倍; CTDLS 算法中各个任务对信任的服务质量因子  $a_i$  在区间 [0, 1] 随机产生; 每组分别进行 10 次, 最终结果取平均值。下面给出 CTDLS 算法和 DLS、HEFT<sup>[22]</sup>算法在不同设置下的性能。

### 6.1 直接信值的衰减实验

在云环境下，服务资源在本质上是高度动态变化的。假定服务资源  $r_i$  是恶意的，在一周内，其重要的服务交易发生在周五，不太重要的服务交易发生在周一到周二。通过周一到周二服务资源  $r_i$  有意地表现出较好的服务质量以建立良好的服务满意度，而在周五提供较低的服务质量。如果不引入可信度衰减模型，上述情况是可以发生的。为了防止上述情况的发生，引入了直接可信度衰减模型，这样周三周四不进行交易会降低信任值，可有效降低恶意情况的发生，同时，通过为衰减常数  $\lambda$  设置不同的值来控制可信度衰减快慢，若该资源发生恶意事件，则设置较大的  $\lambda$  值快速降低信任值。图 2 给出了不同衰减常数  $\lambda$  下，可信值的衰减情况。

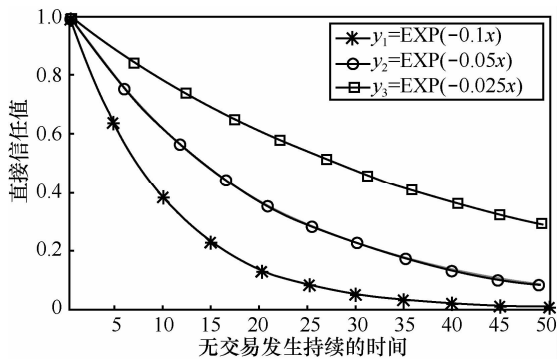


图 2 不同衰减常数  $\lambda$  下的信任值变化情况

### 6.2 信任准确度实验

信任准确度定义为信任成功的次数与执行信任选择的总次数的比值。目前云计算领域获得公认的信任模型比较少，因而，为了验证本文信任评估模型(记为 DRFTM)在捕捉恶意交易行为、发现可靠服务的能力，在不同恶意资源比例下，将 DRFTM 与基于行为反馈的信任模型(记为 BFTM)进行信任准确度对比实验，实验结果如图 3 所示。

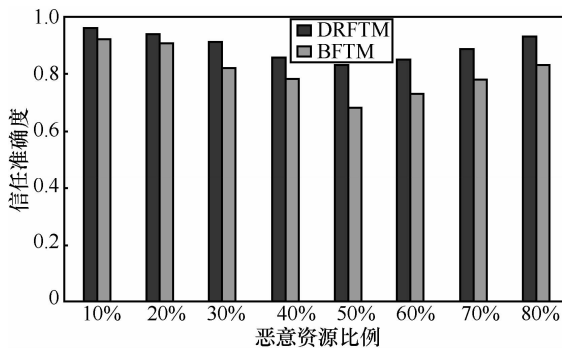


图 3 2 种信任模型在不同恶意资源比例下的信任准确度比较

从图 3 可看出，在不同恶意资源比例下，DRFTM 的信任准确度都高于 BFTM 的信任准确度，当恶意资源比例比较小时，随着比例的增加 2 种模型的信任准确度都下降，50%比例之后 2 种模型的信任准确度都上升。这是因为，当恶意资源比例比较小时对整体信任选择的影响较小，而随着恶意资源比例升高，特别是达到 50%时，BFTM 的信任判断具有明显的随机性，而使用本文的基于直接信任、推荐信任和反馈信任的综合信任计算可有效降低恶意情况的发生，更能真实地反应资源的实际服务性能，因此，DRFTM 表现出比 BFTM 较高的信任准确度。

### 6.3 CTDLS 不同任务数的调度长度和执行成功率实验

在该实验中：设定  $CCR=1.5$ ，随机产生拥有 50 至 120 个子任务的调度图，服务质量因子  $a_i$  的均值为 0.5，服务资源数为 200、链路数为 300 的环境下执行。算法 CTDLS、HEFT<sup>[22]</sup>和 DLS 在调度长度和执行成功率 2 个方面的对比情况如图 4 和图 5 所示。

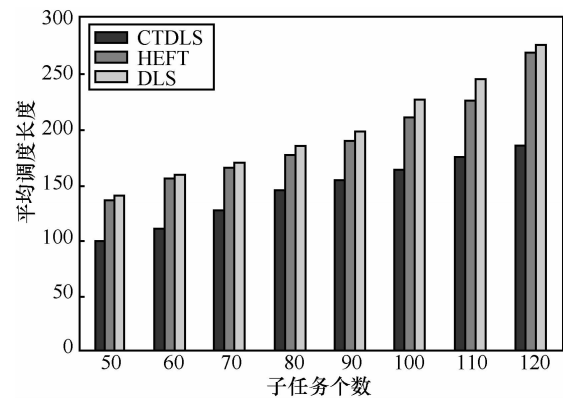


图 4 3 种算法在不同子任务个数下的调度长度比较

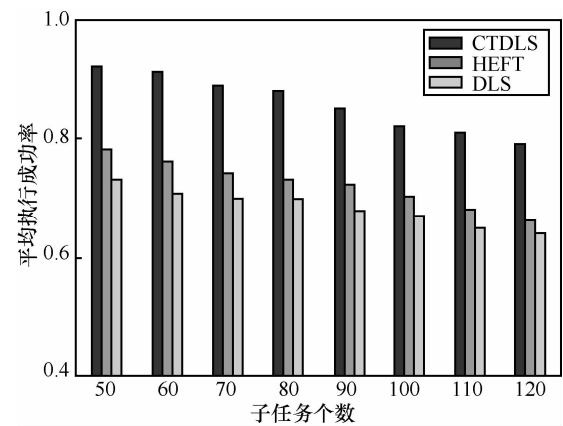


图 5 3 种算法在不同子任务个数下的执行成功率比较

从图 4 中可看出, 随着子任务个数的增加, 3 种算法的平均调度长度都增加, 但 CTDLS 的调度长度都小于 HEFT 和 DLS 的调度长度, HEFT 和 DLS 算法表现得基本一致。这是因为, CTDLS 在为任务分配服务资源时既考虑了子任务对服务质量因子  $a_i$  的需求和服务资源的计算速度, 又考虑了服务资源的综合信任度。评价服务资源综合信任度的直接可信度、间接可信度都涉及到了服务成功率、服务时间满意率和响应时间可接受率, QoS 反馈可信度涉及到了服务的可用性, 因此, 资源的综合信任度大意味着资源的交易成功率高和响应时间小。当任务在 2 个资源上的动态级相等时, 可信度较大的资源其可信动态级较大, CTDLS 算法在为子任务分配资源时选择可信动态级大的资源, 可提高任务执行的成功率, 从而减少任务重调度的次数, 因而, CTDLS 的调度长度总是小于 HEFT 和 DLS 的调度长度。HEFT 算法是表调度算法的典型代表, HEFT 算法尽可能将任务调度到具有最早完成时间的资源节点, 但它没有从整体上在服务资源上对并行任务的子任务的可信需求进行优化, 在调度时没有很好地考虑服务资源的可信度。图 5 显示 CTDLS 的执行成功率大大高于 HEFT 和 DLS, 这也验证了在资源计算速度相同的情况下选择可信度较大的资源执行任务, 减少了任务重新调度的次数, 提高了任务的平均执行成功率。

#### 6.4 CTDLS 不同服务资源数的调度长度和执行成功率实验

在该实验中: 设定  $CCR=1.5$ , 随机产生拥有 200 至 800 个服务资源, 在链路数为 300、任务数为 400、服务质量因子  $a_i$  的均值为 0.5 的环境下执行。对 CTDLS、HEFT 和 DLS 从平均调度长度和执行成功率上进行比较, 结果如图 6 和图 7 所示, 每个点取 10 次实验的平均值。随着服务资源数的增加,

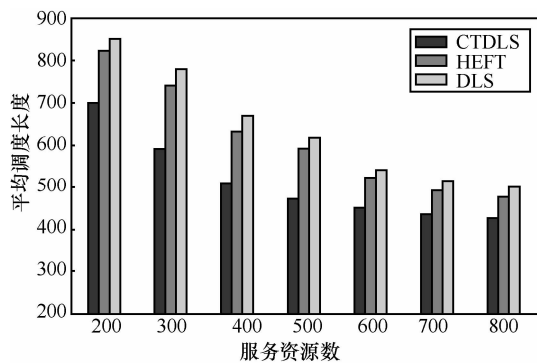


图 6 3 种算法在不同服务资源数下的调度长度比较

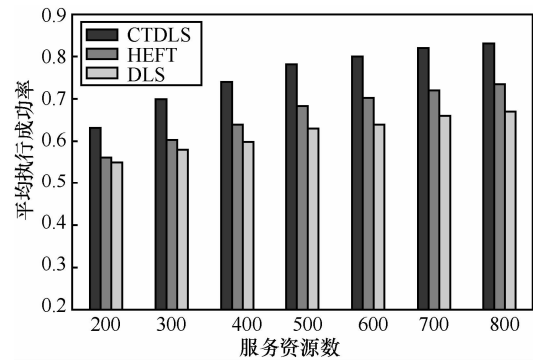


图 7 3 种算法在不同服务资源数下的执行成功率比较

在调度长度和平均执行成功率 2 方面可以得出和实验 6.3 节结果一致的结论: 即 CTDLS 的调度长度总是小于 HEFT 和 DLS 的调度长度, CTDLS 的平均执行成功率总是高于 HEFT 和 DLS 的平均执行成功率。

## 7 结束语

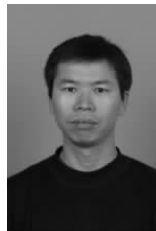
在云计算环境下, 本文针对服务消费者对服务资源有可信需求的问题, 以社会学中的人际关系信任模型为基础, 提出了一种基于服务消费者的服务满意度评价、推荐者的服务推荐和第三方服务性能反馈的可信度量模型。通过熵权的方法确定服务的各服务指标的客观服务权重, 并将其与服务消费者对各服务指标主观赋权方法结合起来, 组合成服务指标的综合权重, 根据各指标的权重, 消费者对服务交易进行服务满意度评价, 根据多次服务交易的服务满意度情况计算服务资源的直接信任度。此外, 通过推荐者对服务资源的各服务指标的权重与消费者对推荐者的各服务指标的权重之间的相似程度、推荐者对提供者的直接信任度的大小和消费者对推荐者的直接信任度的大小, 来评价服务资源被推荐的推荐信任度大小。然后, 通过第三方监控, 对服务资源的实际服务性能进行 QoS 反馈信任度计算。最后, 将用户对服务资源的信任需求和资源的可信度并入 DLS 算法得到可信动态级调度算法, 为服务消费者高效选择高性能的可信服务资源提供了切实可行的方法。但是, 云计算环境是动态变化的, 如何根据上下文环境的变化自适应调整服务指标的权重以及直接信任度、推荐信任度和反馈信任度的权重是下一步要研究的内容。

### 参考文献:

[1] WANG H M, TANG Y B, YIN G, et al. Trustworthiness of Inter-

- net-based software[J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2006,49(6):759-773.
- [2] 胡春华, 刘济波, 刘建勋. 云计算环境下基于信任演化及集合的服务选择[J]. 通信学报, 2011,32(7):71-79.  
HU C H, LIU J B, LIU J X. Services selection based on trust evolution and union for cloud computing[J]. Journal on Communications, 2011,32(7):71-79.
- [3] ADAM T L, CHANDY K M, DICKSON J. A comparison of list scheduling for parallel processing systems[J]. Communication of the ACM, 1974, 17(6):685-690.
- [4] AZZEDIN F, MAHESWARAN M. Integrating trust into grid resource management systems[A]. Proceedings of the 2002 International Conference on Parallel Processing[C]. Vancouver, British Columbia, Canada, 2002.47- 54.
- [5] AHAMED S I, SHARMIN M. A trust-based secure service discovery (TSSD) model for pervasive computing[J]. Journal of Computer Communications, 2008, 31(18):4281-4293.
- [6] LI B, XING M, ZHU J, *et al.* A dynamic trust model for the multi-agent systems[A]. Proc IEEE Int'l Symp. Information Processing (ISIP '08)[C]. 2008.500-504.
- [7] RANGASAMY K, SOMASUNDARAM T S. Trust management system for computational grids[J]. European Journal of Scientific Research, 2012, 79(1):15-23.
- [8] SINGH S, CHAND D. Trust evaluation in cloud based on friends and third party's recommendations[A]. Engineering and Computational Sciences (RAECS)[C]. 2014.1-6.
- [9] 王守信, 张莉, 李鹤松. 一种基于云模型的主观信任评价方法[J]. 软件学报, 2010,21(6):1341-1352.  
WANG S X, ZHANG L, LI H S. Evaluation approach of subjective trust based on cloud model[J]. Journal of Software, 2010,21(6): 1341-1352.
- [10] DAS A, ISLAM M M. Secured trust: a dynamic trust computation model for secured communication in multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2012, 9(2): 261-274.
- [11] ABAWAJY J. Determining service trustworthiness in intercloud computing environments[A]. Proceedings of the 2009 10th International Symposium in Pervasive Systems, Algorithms, and Networks (ISPAN)[C]. 2009.784-788.
- [12] WANG S, ZHANG L, MA N, *et al.* An evaluation approach of subjective trust based on cloud model[A]. Proceedings of Computer Science and Software Engineering[C]. 2008.1062-1068.
- [13] 王刚, 桂小林. 社会网络中交易节点的选取及其信任关系计算方法[J]. 计算机学报, 2013,36(2):368-383.  
WANG G, GUI X L. Selecting an trust computing for transaction nodes in online social networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 368-383.
- [14] 田春岐, 江建慧, 胡治国等. 一种基于聚集超级节点的 P2P 网络信任模型[J]. 计算机学报, 2010,33(2):345-355.  
TIAN C Q, JIANG J H, HU Z G, *et al.* A novel super-peer based trust model for peer-to-peer networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(2): 345-355.
- [15] 邓晓衡, 卢锡城, 王怀民. iVCE 中基于可信评价的资源调度研究[J]. 计算机学报, 2007,30(10):1750-1762.  
DENG X H, LU X C, WANG H M. Study on trust evaluation based resource scheduling in iVCE[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(10): 1750-1762.
- [16] 胡建理, 吴泉源, 周斌等. 一种基于反馈可信度的分布式 P2P 信任模型[J]. 软件学报, 2009,20(10):2885-2898.  
HU J L, WU Q Y, ZHOU B, *et al.* Robust feedback credibility-based distributed P2P trust mode[J]. Journal of Software, 2009, 20(10): 2885-2898.
- [17] 张琳, 刘正邦, 王海艳等. 一种支持行为的可用于信息服务的动态信任监控模型[J]. 南京邮电大学学报, 2013,33(1):68-73.  
ZHANG L, LIU Z B, WANG H, Y, *et al.* Dynamic trust monitoring model supporting behavior in information services[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013,33(1):68-73.
- [18] 李小勇, 桂小林, 毛倩等. 基于行为监控的自适应动态信任度测模型[J]. 计算机学报, 2009,32(4):664-674.  
LI X Y, GUI X L, MAO Q, *et al.* Adaptive dynamic trust measurement and prediction model based on behavior monitoring[J]. Chinese Journal of Computers, 2009,32(4):664-674.
- [19] PEARSON S. Privacy, Security and Trust in Cloud Computing[M]. Privacy and Security for Cloud Computing. Springer London, 2013.
- [20] SIH G C, LEE E A. A compile-time scheduling heuristic for interconnection-constrained heterogeneous processor architectures[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1993, 4(2):175-186.
- [21] CALHEIROS R N, RANJAN R, ROSE C A F D, *et al.* Cloudsim: a novel framework for modeling and simulation of cloud computing infrastructures and services[EB/OL]. arXiv preprint arXiv:0903.2525, 2009.
- [22] TOPCUOGLU H, HARIRI S, WU M Y. Performance-effective and low complexity task scheduling for heterogeneous computing[J]. IEEE Trans Parallel Distrib Systems, 2002, 13 (3):260-274.

#### 作者简介:



曹洁 (1980-), 男, 河南新乡人, 同济大学博士生, 主要研究方向为并行分布式计算、云计算和可信计算。



曾国荪 (1964-), 男, 江西吉安人, 博士, 同济大学教授、博士生导师, 主要研究方向为并行分布计算、可信网络软件。

姜火文 (1974-), 男, 江西南昌人, 同济大学博士生, 主要研究方向为分布式计算、软件演化。

马海英 (1977-), 女, 河南卫辉人, 同济大学博士生, 南通大学讲师, 主要研究方向为公钥密码学和网络安全。