

Web 服务质量动态预测方法研究

刘志中*, 宋 成, 安吉宇, 鲁保云

(河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

(*通信作者电子邮箱 lzzmff@126.com)

摘 要:随着面向服务计算技术(SOC)的快速发展,网络上出现了大量功能相同而服务质量(QoS)有很大差别的 Web 服务, QoS 成为评价和选择 Web 服务的重要依据。由于 Web 服务所在环境的开放性,使得 Web 服务的 QoS 具有很强的动态性,如何精确地预测 Web 服务的 QoS 成为影响服务选择和服务组合质量的关键问题。对当前已有的 Web 服务 QoS 动态预测方法进行了深入的剖析,指出了现有 QoS 动态预测方法的优点与不足,讨论了未来的研究方向;明确了存在的关键问题以及未来的发展方向。

关键词: Web 服务; 服务质量; Web 服务组合; 服务质量预测

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Survey of dynamic prediction method for Web service quality of service

LIU Zhizhong*, SONG Cheng, AN Jiyu, LU Baoyun

(College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: With the rapid development of Service Oriented Computing (SOC), more and more Web services with the same functionalities and different Quality of Service (QoS) are available on the Web. QoS becomes an important basis for evaluating and selecting Web services. As the environment of Web services is open, the QoS of Web services are dynamic. How to accurately predict Web services' QoS becomes a key factor that affects the success of QoS based Web service selection and composition. Here existing Web service QoS prediction methods were deeply analyzed, and the advantages and disadvantages of these existing methods are pointed out, and the future research directions of Web service QoS dynamic prediction were explored.

Key words: Web service; Quality of Service (QoS); Web service composition; QoS prediction

0 引言

Web 服务^[1]是一种自适应、自描述、模块化的网络构件,可以在网络中被描述、发布、查找和调用。Web 服务一旦被部署,其他 Web Service 应用程序可以发现并调用已经部署的 Web 服务。通过 Web 服务组合技术可以将异构的 IT 资源聚合成功能强大的组合 Web 服务,以此来满足复杂业务的需求。目前,Web 服务已经成为虚拟企业、电子商务以及电子政务有效的解决方案,是面向服务计算(Service Oriented Computing, SOC)^[2]和云计算(Cloud Computing)^[3]领域的研究重点,学术界和工业界对其给予了密切的关注。

随着面向服务计算技术的日趋成熟,网络上出现了大量功能相同或相近而服务质量(Quality of Service, QoS)有很大差别的 Web 服务, QoS 成为评价和选择 Web 服务的重要依据。在基于 QoS 的 Web 服务选择和组合中,研究者大都将 Web 服务历史 QoS 的平均值当作 Web 服务的 QoS^[4],这种处理方法虽然简单易于实现,但忽略了 Web 服务 QoS 的动态性。事实上,在开放的网络环境下,Web 服务的 QoS 具有高度的动态性,把 Web 服务历史 QoS 的平均值当作 Web 服务的

QoS,将导致所选择或组合的 Web 服务很可能不能满足用户的 QoS 需求,从而导致 Web 服务选择和组合的失败。

为了提高 Web 服务 QoS 的准确度,一些研究者对 Web 服务 QoS 预测开展了研究。通过预测 Web 服务的 QoS,可以有效地提高 Web 服务 QoS 的准确度,从而可以客观、公正地评价 Web 服务,提高服务选择和组合的成功率以及用户的满意度,进而促进 Web 服务应用的推广,推动服务计算、云计算的快速发展。

Web 服务 QoS 动态预测研究还处于初期阶段,已有的 QoS 预测方法虽然在一定程度上提高了 Web 服务 QoS 的准确度,但这些方法还存在一些不足,不能满足实际应用的需要。基于此,本文对 Web 服务 QoS 预测问题进行了深入的剖析,对已有的 QoS 预测方法进行了讨论,指出了已有方法的优点和不足,探索了需要解决的关键问题。

1 单 Web 服务 QoS 预测

QoS 感知的 Web 服务选择是从候选 Web 服务群中,依据 Web 服务的 QoS 评价,为用户选择最优的 Web 服务。为了提高 Web 服务 QoS 的准确度,一些研究人员提出了一些 QoS

收稿日期:2013-10-08;修回日期:2013-12-03。

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61300124);河南理工大学校博士基金资助项目。

作者简介:刘志中(1981-),男,河南周口人,讲师,博士,CCF 会员,主要研究方向:服务计算、云计算; 宋成(1980-),男,河南信阳人,讲师,博士,CCF 会员,主要研究方向:信息安全; 安吉宇(1977-),男,吉林长春人,副教授,博士,主要研究方向:服务建模; 鲁保云(1979-),女,河南南阳人,讲师,博士,主要研究方向:物流服务。

预测方法,这些方法概括起来可以分为三类:第一类是基于相似度的Web服务QoS预测方法,主要包括基于协同过滤方法、改进的协同过滤法和服务历史使用信息的QoS预测方法;第二类是基于人工智能的Web服务QoS预测方法,主要包括神经网络法、免疫信号法和事例推理法;第三类是基于结构方程的Web服务QoS预测。下面分别对这些预测方法进行分析 and 讨论。

1.1 基于相似度的Web服务QoS预测方法

在单Web服务QoS预测研究中,主要集中于基于相似度的Web服务QoS预测方法,这些预测方法的思想是根据用户之间的相似度和服务之间的相似度来预测目标服务的QoS。

Shao等^[5]在2007年最早提出使用协同过滤法(Collaborative Filtering Method)对用户未使用过的Web服务的QoS进行预测。这种预测方法假设:在某些Web服务上具有相似质量体验的用户,在其他Web服务上也会有相似的质量体验。该预测方法首先基于历史用户使用Web服务时的QoS体验值,采用协同过滤法计算任意两个用户之间的相似度,然后依据与目标用户相似度较高的历史用户提供的QoS值,预测目标用户未使用过的Web服务的QoS。

该预测方法在计算相似度时采用了Pearson相关系数,而该系数常用于度量数据之间的线性相关关系,不能很好地解释客观QoS数据之间的相似性;并且该预测方法只考虑用户之间的相似度,而没有考虑Web服务之间的相似度,使得预测效果不太理想。

针对上述问题绍凌霜等^[6]对协同过滤方法进行了改进,提出了基于欧几里得距离的相似度计算公式,并给出了一种综合考虑用户相似度和服务相似度的QoS预测方法。该预测方法首先采用改进的协同过滤方法计算用户之间的相似度和服务之间的相似度;然后,基于用户之间的相似度和服务之间的相似度预测目标服务的QoS;最后,对得到的两种QoS预测值的进行加权求和运算,从而获得目标服务最终的QoS预测值。

在基于用户之间的相似度和服务之间的相似度来预测目标服务的QoS值时,由于两种QoS预测值具有不同的预测精度,为了提高目标服务QoS的准确度,Zheng等^[7]提出了一种基于混合协同过滤方法的QoS预测方法。该预测方法设计了两种信心权重,其中一种信心权重表示对基于用户之间相似度得到的QoS预测值的信任程度,另一种信心权重表示对基于服务之间相似度得到的QoS预测值的信任程度。通过引入这两种信心权重,可以自动地调整QoS预测过程中对两种预测值的依赖程度,从而提高QoS预测的准确度。

在采用基本的或改进的协同过滤方法对Web服务的QoS进行预测时,存在以下不足之处:

1)在计算两个用户之间的相似度时,采用的是被这两个用户使用过的所有Web服务的QoS值。当两个用户对其所使用过的Web服务具有相似的体验时,这些服务的QoS数据是有效的;而当两个用户对某些Web服务的使用体验不相似时,这些Web服务的QoS数据是无效的,并且会导致相似度计算误差。事实上,由于网络和其他因素之间的差异,两个用户不可能在所有的服务上都有相似的体验;因此,这种基于用户相似度的服务质量预测方法还存在一些不足,应该剔除那些没有作用的数据。

2)在使用协同过滤方法预测Web服务的QoS时,由于用户不可能对所有的Web服务都有使用体验,所以在历史QoS数据信息中会存在很多缺失值,从而影响预测的精度,如何弥补这些缺失信息是需要解决的一个关键问题。

为了解决上述两个问题,Zhang等^[8]给出了一种基于Web服务使用信息的QoS预测方法,该方法首先依据服务的历史QoS数据计算目标服务与其他服务之间的相似度;然后选出 n 个与目标服务最相似的Web服务,依据这些服务的QoS数据建立信息矩阵,并利用相似服务的QoS数据填补信息矩阵中缺失的QoS信息;最后,依据完善后的QoS信息矩阵,计算目标用户和其他用户的相似度,根据用户之间的相似度此来预测目标服务的QoS值。该预测方法的具体计算流程如下所述:

1)设 U_r 为目标用户, S_r 为目标服务, S_j 为其他用户 U_j 使用过的服务,首先计算服务 S_r 与 S_j 之间的相似度,其中, $j=1,2,\dots,k$ 。

2)依据目标服务与其他服务之间的相似度,选出与目标服务最为相似的 n 个服务,设这 n 个服务为 $S=\{S'_1,S'_2,\dots,S'_n\}$ 。依据这 n 个服务构建QoS信息矩阵 T_{sim}, T_{sim} 中可能会在服务 S'_i 的位置缺失QoS信息,这时利用与服务 S'_i 相似的服务的QoS数据来填补缺失的QoS信息。

3)基于信息矩阵 T_{sim} ,计算目标用户 U_r 与使用过 S 中服务的用户之间的相似度;根据目标用户与历史用户之间的相似度以及历史用户使用服务时的QoS体验,采用加权平均的方法预测目标服务的QoS。

该预测方法与基于协同过滤法的预测方法相比具有以下优点:

1)在计算目标用户与历史用户之间的相似度时,所采用QoS数据信息不是全部服务的QoS数据信息,而是那些与目标服务最为相似的 n 个服务的QoS数据信息。这样既提高了计算速度又提高了预测准确度。

2)采用相似服务的QoS数据填补QoS信息矩阵中的空缺值,从而提高预测的精度。

1.2 基于人工智能的Web服务QoS预测方法

人工智能领域的很多方法都具有一定的预测功能,一些学者借助人工智能的研究成果对Web服务QoS预测进行了研究,主要包括基于免疫系统的Web服务信誉度预测方法、基于神经网络的Web服务QoS预测方法和基于事例推理的Web服务QoS动态预测方法。

文献[9]提出了一种基于免疫系统多信号机制的Web服务QoS预测模型,该预测模型只给出了如何借助于免疫系统的多信号机制实现Web服务信誉度的预测,没有给出如何预测出Web服务的QoS属性值(比如服务的反应时间、可靠性、可用性等)。

人工神经网络在电力负荷预测、大气预测等方面取得了成功应用,鉴于此,文献[10]提出了一种基于BP(Back-Propagation)神经网络的Web服务QoS预测方法,该方法通过收集用户反馈的QoS数据,利用这些QoS数据对BP神经网络进行训练,然后利用训练好的BP神经网络对服务的QoS进行预测。但BP神经网络存在收敛速度慢、识别精度不确定和过学习等问题。

径向基函数(Radial Basis Function, RBF)网络具有结构

自适应、网络设计简单、训练时间短等优点,鉴于此,文献[11]提出了一种基于 RBF 神经网络的 Web 服务 QoS 短期预测方法。该方法将 Web 服务历史 QoS 作为训练数据对 RBF 神经网络进行训练,并将训练好的 RBF 神经网络用于预测 Web 服务的可靠性、可用性、费用和执行时间。

上述两种基于神经网络的 Web 服务 QoS 预测方法虽然在一定程度上能够提高 Web 服务 QoS 的准确度,但还存在以下不足:用于训练神经网络的数据缺乏在线更新机制。由于 Web 服务本身功能的完善、网络性能的提高以及 Web 服务所在服务器配置的更新,都会导致 Web 服务性能的变化,因此,需要采用在线训练或采用增量式的 QoS 数据集对神经网络进行训练。

通常情况下,Web 服务的 QoS 与 Web 服务所在服务器的负载、网络传输率、任务类型以及任务量的大小具有很强的关联性,上述因素中的一个或几个发生变化都会引起 Web 服务 QoS 的波动。而上述基于相似度和基于神经网络的 Web 服务 QoS 预测方法,在对 Web 服务的 QoS 进行预测时,没有考虑 Web 服务所处的环境因素和任务特征的变化,使得这些预测方法与 Web 服务的实际运行情况不相符,使用范围具有一定的局限性。

针对这一问题,刘志中等^[12]提出了一种基于事例推理的 Web 服务 QoS 动态预测方法。该预测方法的主要思想是:在外界环境因素相同或相似时,Web 服务在处理相同或相似任务时的 QoS 是相同或相似的。该方法依据引起 QoS 波动的主要因素和 Web 服务处理任务时表现出来的 QoS 值构造历史 QoS 事例;当接收到新的服务请求时,依据任务的类型和任务量的大小以及 Web 服务所处环境的信息编制目标 QoS 事例,然后应用事例推理技术预测 Web 服务处理新任务时的 QoS 值。该预测方法的优点是考虑的因素更加全面,比较符合 Web 服务实际的执行情况,属于细粒度的预测方法,具有

较高的预测精度,使用范围较广。但该方法在构建 QoS 事例库时没有考虑 QoS 事例的时效性,没有给出完整的 QoS 事例库的学习机制,并且该方法属于即时预测方法,不能用于预测未来一段时间之后 Web 服务处理具体任务时的 QoS 值。

1.3 其他单 Web 服务 QoS 预测方法

一些研究者借助于其他预测机制构造了 Web 服务 QoS 预测方法,主要包括基于结构方程模型的 Web 服务 QoS 预测方法。

结构方程模型 (Structural Equation Model) 是基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的一种统计方法,是一种建立、估计和检验因果关系模型的方法。模型中既包含有可观测的显在变量,也可能包含无法直接观测的潜在变量。结构方程模型可以替代多重回归、通径分析、因子分析、协方差分析等方法,清晰分析单项指标对总体的作用和单项指标间的相互关系,因此可以用结构方程模型来刻画 Web 服务 QoS 的变化。

Li 等^[13]基于结构方程模型的预测机制给出了一种定量预测 Web 服务 QoS 变化的方法。这种方法首先通过服务的历史 QoS 信息分析单个 QoS 属性的变化趋势,然后预测该 QoS 属性在未来时间段内的变化值。该预测方法既可以用于单 Web 服务 QoS 变化的预测,又可以用于组合服务替换时候选服务 QoS 的变化预测。这种预测方法的缺点是只能预测 QoS 变化而不能预测出具体的 QoS 值。

1.4 单 Web 服务 QoS 预测研究总结

上述 Web 服务 QoS 预测方法在一定程度上能够提高 Web 服务 QoS 值的准确度,提高了 Web 服务选择的成功率和用户的满意度,推动了 Web 服务 QoS 预测的研究工作。但这些预测方法还存在需要完善的地方。这里对上述方法进行了比较,如表 1 所示。

表 1 Web 服务 QoS 预测方法比较

预测方法	主要思想	主要特征
协同过滤法	利用相似用户的服务质量体验预测目标服务的 QoS 值	优点 使用简单,预测速度较快,比较适合于功能简单、具有较多使用记录的 Web 服务 缺点 没有考虑服务之间的相似度对预测精度的影响;没有给出缺失信息的填补方法;预测精度较低;使用范围有限,只能用于功能单一、任务确定的 Web 服务 QoS 预测
改进的协同过滤法	利用目标用户与相似用户之间的相似度和目标服务与其他服务之间的相似度预测目标服务的 QoS 值	优点 使用简单,预测速度较快,预测精度有所提高,比较适合于功能简单、具有较多使用记录的 Web 服务 缺点 没有给出缺失信息的填补方法;预测精度低;使用范围有限,只能用于功能单一、任务确定、环境因素不变的 Web 服务 QoS 预测
服务相似度法	使用与目标服务具有较高相似度的服务的 QoS 信息预测目标服务的 QoS 值	优点 使用简单,预测思想较为合理,预测速度较快,预测精度较高,比较适合于功能简单、具有较多使用记录的 Web 服务 缺点 使用范围有限,只能用于功能单一、环境因素与任务不变的 Web 服务 QoS 预测;不能用户新注册 Web 服务 QoS 的预测
神经网络法	利用 Web 服务的历史 QoS 数据训练神经网络,应用训练好的神经网络预测 Web 服务的 QoS	优点 使用范围较广,能够用于具有多种功能、环境因素与任务可变的 Web 服务 QoS 预测 缺点 训练速度较慢,缺乏在线训练机制
事例推理法	在外界环境相同或相似时,Web 服务处理相同或相似任务时的 QoS 是相同或相似的	优点 使用范围较广,支持多功能、环境因素与任务可变的 Web 服务 QoS 预测;具有较高的预测精度 缺点 没有考虑 QoS 事例的时间效用
结构方程模型法	利用结构方程模型的预测机制预测 Web 服务 QoS 的变化	优点 使用简单,预测速度较快,比较适合于功能简单、具有较多使用记录的 Web 服务 缺点 只能用于预测 Web 服务 QoS 的变化,不能预测具体的 QoS 值
免疫信号法	利用免疫系统的多信号机制预测 Web 服务的信誉度	优点 使用简单,预测速度较快 缺点 只能预测出 Web 服务的信誉度,也不能预测出具体的 QoS 值

Web 服务 QoS 的预测研究还处于初期阶段,还存在以下关键问题需要解决:

1) 如何提高 Web 服务 QoS 预测的精度。

提高 Web 服务 QoS 的预测精度是 Web 服务 QoS 预测研究的一个重要目标。Web 服务所在环境的开放性、用户需求的动态性以及 Web 服务所在服务器负载的波动,造成 Web 服务的 QoS 具有较强的动态性,使得 Web 服务 QoS 预测成为一个难题。如何设计一种具有较高预测精度的 Web 服务 QoS 预测方法是一个亟待解决的问题。

2) 如何解决 Web 服务 QoS 预测与快速 Web 服务选择之间的矛盾。

Web 服务 QoS 预测虽然能够提高 Web 服务 QoS 准确度,但当候选 Web 服务数量较大时,对所有的 Web 服务进行预测将会耗费一定的时间,而用户往往要求能够尽快选出最优的 Web 服务。如何协调 Web 服务 QoS 预测与 Web 服务快速选择是亟待解决的另一个关键问题。

3) 如何提高 Web 服务 QoS 预测方法的自适应能力。

由于 Web 服务所在的网络环境、硬件环境以及 Web 服务本身功能的完善等,都会引起 Web 服务 QoS 的变化,因此,Web 服务 QoS 预测方法要能够及时感知上述因素的变化,改善自己的预测能力,提高预测精度。

2 组合 Web 服务 QoS 预测

Web 服务组合是指将若干个独立的、自治的 Web 服务按照一定的逻辑结构组合起来提供增值服务的过程^[14]。组合 Web 服务的 QoS 是进行组合 Web 服务评价的主要依据,在进行 QoS 感知的 Web 服务组合时,同样面临如何提高组合 Web 服务的 QoS 准确度的问题。组合 Web 服务的 QoS 取决于组件服务的 QoS 和组件服务之间的组合模式^[15],由于组件服务 QoS 的动态性以及组件服务之间的联动性,使得组合 Web 服务的 QoS 预测成为一个更为复杂的问题。目前关于组合 Web 服务 QoS 预测研究刚刚起步,所能查阅到的文献还比较少。

Hwang 等^[16]首先提出了一种基于概率模型的组合 Web 服务 QoS 预测方法,该方法将组件服务的 QoS 值看作随机变量,对组件服务的每个 QoS 属性构建其概率质量函数,然后根据组件服务 QoS 的概率质量函数以及组件服务之间的组合模式,拟合出整个组合 Web 服务的 QoS 概率质量函数,并依据组合 Web 服务的 QoS 概率质量函数预测组合 Web 服务的 QoS 满足用户 QoS 约束的概率。

这种预测方法的预测粒度较粗,因为 Web 服务在处理不同类型的任务时的 QoS 概率质量函数是不同的,如果能够针对每种类型的任务建立 QoS 属性的概率质量函数将能提高预测精度;在拟合组合 Web 服务 QoS 属性的概率质量函数时,假设每个组件服务之间是独立的,这种假设与实际情况不符,事实上,组件服务之间的 QoS 是相互影响的。所以在预测组合 Web 服务的 QoS 时,需要考虑组件服务之间的关系及相互影响情况。

陶春华等^[17]给出了一种基于概率方法的 QoS 感知 Web 服务组合方法,该方法首先假设已经通过文献[18]的方法得到了组合 Web 服务 QoS 的概率质量函数,然后定义了基于概率模型的 QoS 目标,设计了用于测量组合方案与 QoS 目标之间的距离函数。将 Web 服务组合转化为组合优化问题,并采

用 Rollout 算法得到问题的近似最优解。

Geebelen 等^[19]提出了一种基于在线支持向量机的组合 Web 服务 QoS 预测方法,该预测方法首先采用在线支持向量机预测组件服务的 QoS,然后基于组件服务的 QoS 预测值预测组合 Web 服务的 QoS,并依据预测的组合 Web 服务的 QoS 计算质量协议的概率。该文献提出的基于核函数的预测方法能够对 QoS 之间的非线性进行学习,并且该预测方法具有一定的在线自适应性。通过实验表明该预测方法在预测组合 Web 服务时间相关的 QoS 属性时具有较好的预测效果。

由于每个组件服务的 QoS 具有不同的特征,在预测组合 Web 服务的 QoS 时需要为每一个组件服务训练一个在线支持向量机,增加了组合 Web 服务 QoS 预测的难度。因此,该方法比较适合用于预测组件服务比较固定的组合 Web 服务的 QoS。

QoS 感知的 Web 服务组合本身是一个典型的 NP-hard 问题,在寻找最优 Web 服务组合方案的同时提高组合 Web 服务质量的可靠性是一个较为复杂的问题,也是服务计算领域亟待解决的问题。组合 Web 服务 QoS 预测研究还存以下关键问题需要进行深入的研究:

1) 如何提高组合 Web 服务 QoS 的预测精度。由于组合 Web 服务的 QoS 取决于组件服务的 QoS,而组件服务的 QoS 具有一定的动态性,从而导致组合 Web 服务的 QoS 具有较强的动态性。在对组件服务的 QoS 预测时,已经存在一定的误差,再依据组件服务的 QoS 计算出来的组合 Web 服务的 QoS 的误差将会更大,因此,如何提高组合 Web 服务 QoS 的预测精度是一个亟待解决的难题。

2) 如何实现服务质量有保证的 Web 服务快速优化组合。QoS 感知的 Web 服务优化组合本身是一个 NP 问题,当候选 Web 服务的规模较大时,服务组合算法的复杂度比较高,如果在 Web 服务组合的过程中再预测组件服务的 QoS,将会增加 Web 服务组合的时间。如何实现快速、可靠的 Web 服务优化组合是另一个亟须解决的问题。

3 结语

Web 服务技术是开放、动态和多变的网络环境下构建软件系统的新模式,蕴藏着巨大的应用价值,已经成为国内外研究的热点。然而,由于可用服务数量的剧增以及 QoS 的动态性,使得 QoS 感知的 Web 服务选择和组合成功率较低。通过 Web 服务 QoS 预测可以提高 Web 服务 QoS 准确度,而 Web 服务 QoS 预测和组合 Web 服务 QoS 预测研究还处于起始阶段,本文对目前已有的 Web 服务 QoS 预测方法以及组合 Web 服务 QoS 的预测方法进行了深入的分析与讨论,指出了已有方法的优点与不足,探索了未来的研究方向。该研究成果有助于从事 Web 服务 QoS 预测的研究人员快速地了解该问题的研究现状,明确存在的关键问题,从而提高研究效率。

参考文献:

- [1] NEWCOMER E, LOMOW G. Understanding SOA with Web service [M]. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 2004.
- [2] HUHNS M, SINGH M. Service-oriented computing: key concepts and principles [J]. IEEE Internet Computing, 2005, 9(1): 75 - 81.

- [3] CHEN K, ZHENG W. Cloud computing: system instances and current research [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(5): 1337–1348. (陈康, 郑伟民. 云计算: 系统实例与研究现状[J]. *软件学报*, 2009, 20(5): 1337–1348.)
- [4] ZENG L, ENATALLAH B, NGU A, *et al.* QoS-aware middleware for Web services composition [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2004, 30(5): 311–327.
- [5] SHAO L, ZHANG J, WEI Y, *et al.* Personalized QoS prediction for Web services via collaborative filtering [C]// *ICWS 2007: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Web Services*. Piscataway: IEEE, 2007: 439–446.
- [6] SHAO L, ZHOU L, ZHAO J, *et al.* Web service QoS prediction [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(8): 2062–2073. (邵凌霄, 周立, 赵俊峰, 等. 一种 Web Service 的服务质量预测方法[J]. *软件学报*, 2009, 20(8): 2062–2073.)
- [7] ZHENG Z, MA H, LYU M, *et al.* WSRec: a collaborative filtering based Web service recommender system [C]// *ICWS 2009: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Web Services*. Piscataway: IEEE, 2009: 437–444.
- [8] ZHANG L, ZHANG B, NA J, *et al.* An approach for Web service QoS prediction based on service using information [C]// *ICSS 2010: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Service Sciences*. Piscataway: IEEE, 2010: 324–328.
- [9] HANG J, HU Z. Multiple-signal prediction model for QoS of Web services inspired by immune system [J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2009, 34(4): 535–539. (黄景文, 胡志华. Web 服务 QoS 的免疫多信号预测模型研究[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2009, 34(4): 535–539.)
- [10] LIU K, WANG H, XU Z. A Web service selection mechanism based on QoS prediction [J]. *Computer Technology and Development*, 2007, 17(8): 103–105. (刘克非, 王红, 许作萍. 一种基于服务质量预测的 Web 服务选择方法[J]. *计算机技术与发展*, 2007, 17(8): 103–105.)
- [11] ZHANG J, SONG J. A short-term prediction for QoS of Web service based on RBF neural networks [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2010, 29(5): 918–921. (张金宏, 宋杰. 基于 RBF 神经网络的 Web 服务 QoS 短期预测[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2010, 29(5): 918–921.)
- [12] LIU Z, WANG Z, ZHOU X, *et al.* Dynamic prediction method for Web service QoS based on case based reasoning [J]. *Computer Science*, 2011, 38(2): 119–122. (刘志中, 王志坚, 周晓峰, 等. 基于事例推理的 Web 服务 QoS 动态预测研究[J]. *计算机科学*, 2011, 38(2): 119–122.)
- [13] LI M, HUAI J, GUO H. An adaptive Web services selection method based on the QoS prediction mechanism [C]// *WI-IAT '09: Proceedings of the 2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 395–402.
- [14] MALAK J S, MOHSENZADEH M, SEYYEDI M A. Web service QoS prediction based on multi Agents [C]// *ICCTD '09: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computer Technology and Development*. Piscataway: IEEE, 2009: 265–269.
- [15] LEYMAN F, ROLLER D, SEHMID M-T. Web services and business process management [J]. *IBM System Journal*, 2002, 41(2): 198–211.
- [16] HWANG S-Y, WANG H, TANG J, *et al.* A probabilistic approach to modeling and estimating the QoS of Web service-based workflows [J]. *Information Sciences*, 2007, 177(23): 5484–5503.
- [17] TAO C, FENG Z. QoS-aware Web service composition based on probability approach [J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(10): 860–865. (陶春华, 冯志勇. 基于概率方法的 QoS 感知 Web 服务组合[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(10): 860–865.)
- [18] KIEPUSZEWSKI B, ter HOFSTEDE A H M, BUSSLER C. On structured workflow modeling [C]// *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Information Systems Engineering*. London: Springer-Verlag, 2000: 431–445.
- [19] GEEBELEN D, GEEBELEN K, TRUYEN E, *et al.* QoS prediction for Web service compositions using kernel-based quantile estimation with online adaptation of the constant offset [J]. *Information Sciences*, 2014, 268: 397–424.

(上接第 1287 页)

- [4] Telecom ParisTech. DPA contest 2008/2009 [EB/OL]. [2013-08-09]. <http://www.dpacontest.org/>.
- [5] International Association for Cryptologic Research. Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES) [EB/OL]. [2013-08-09]. <http://www.iacr.org/meetings/ches>.
- [6] EISENBARTH T. Workshop on cryptographic hardware and embedded systems 2008(CHES 2008) [EB/OL]. [2013-08-09]. <http://www.chesworkshop.org/>.
- [7] BRIER E, CLAVIER C, OLIVIER F. Correlation power analysis with a leakage model [C]// *CHES 2004: Proceedings of the 6th International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 16–29.
- [8] KOMANO Y, SHIMIZU H, KAWAMURA S. BS-CPA: built-in determined sub-key correlation power analysis [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2010, E93-A(9): 1632–1638.
- [9] MANGARD S, OSWALD E, POPP T. Power analysis attacks: revealing the secrets of smart cards [M]. New York: Springer Publishing Company, 2010.
- [10] LE T H, CANOVAS C, CLÉDIÈRE J. An overview of side channel analysis attacks [C]// *ASIACCS '08: Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security*. New York: ACM, 2008: 33–43.
- [11] MESSERGERS T S, DABBISH E A, SLOAN R H. Examining smart-card security under the threat of power analysis attacks [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2002, 51(5): 541–552.
- [12] BEVAN R, KNUDSEN E. Ways to enhance differential power analysis [C]// *Proceedings of the 5th International Conference*. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 327–342.
- [13] LE T H, CLÉDIÈRE J, CANOVAS C, *et al.* A proposition for correlation power analysis enhancement [C]// *CHES 2006: Proceedings of the 8th International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 174–186.