

# 基于事例推理的 Web 服务 QoS 动态预测研究

刘志中<sup>1</sup> 王志坚<sup>1</sup> 周晓峰<sup>1</sup> 娄渊胜<sup>1</sup> 尚 颖<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河海大学计算机与信息工程学院 南京 210098)

(<sup>2</sup> 法国里尔科学与技术大学基础信息科学学院 法国里尔 59655)

**摘 要** 随着面向服务计算技术的发展,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 逐渐成为评价和选择 Web 服务的重要依据。目前常用 Web 服务历史 QoS 的算术平均值来近似服务的 QoS,这种度量方法没有考虑 Web 服务 QoS 的动态性,不能准确地度量 Web 服务的 QoS,从而造成被选择的 Web 服务以较大概率不能满足用户的 QoS 需求。针对这一问题,提出了一种基于事例推理(CBR)的 QoS 动态预测方法,该方法将 Web 服务的 QoS 与服务的外界环境、所处理的业务类型、任务大小关联起来,利用事例推理技术预测 Web 服务处理新任务时的 QoS。实验结果表明,该预测方法能有效地提高 Web 服务 QoS 的准确度。

**关键词** Web 服务选择, QoS 动态预测, 事例推理

**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A

## Dynamic Prediction Method for Web Service QoS Based on Case-based Reasoning

LIU Zhi-zhong<sup>1</sup> WANG Zhi-jian<sup>1</sup> ZHOU Xiao-feng<sup>1</sup> LOU Yuan-shang<sup>1</sup> SHANG Ling<sup>2</sup>

(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)<sup>1</sup>

(MAP Team, Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille 59655, France)<sup>2</sup>

**Abstract** With the rapid growth of functionally similar Web services over the Web, Quality of Services(QoS) is becoming a decisive factor for Web service selection. However, current QoS measurement method generally takes the mean value of Web service history QoS values as the service's QoS, and hasn't taken the dynamic nature of service performance into consideration, and cannot measure QoS of Web services accurately, as a result, many selected services cannot satisfy consumer's QoS constraints. In our framework, a dynamic QoS prediction method based on Case-Based Reasoning(CBR) was provided, this method associates Web service QoS with the environment of service, task type and task size together, when a new service request comes, CBR is applied to predict QoS of the Web service in completing the new request. Experimental results show that, this method can improve accuracies of QoS of Web service effectively.

**Keywords** Web service selection, QoS dynamic prediction, Case based reasoning

## 1 引言

Web 服务作为一种新型分布式计算模型,近年来得到了工业界和学术界的极大关注。随着 Web 服务数量的增多,出现了许多具有相同功能和不同服务质量(Quality of Service, QoS)的 Web 服务,QoS 逐渐成为评价和选择服务的重要依据。如何动态地发现满足用户 QoS 约束的最优 Web 服务,是服务发现领域的研究热点<sup>[1]</sup>。而目前通常用 Web 服务历史 QoS 的算术平均值来近似服务的 QoS<sup>[2]</sup>,并假设在评价、选择 Web 服务时这些 QoS 是不变的。事实上,由于 Web 服务外界环境的动态性及任务类型、任务大小的不同,使得 Web 服务的 QoS 具有很强的波动性,如果采用 Web 服务历

史 QoS 的算术平均值来近似服务的 QoS,将会导致以下问题:(1)不能准确地度量 Web 服务的 QoS;(2)不能公正地评价 Web 服务,造成被选择的服务不能满足用户的 QoS 需求。所以,如何动态地预测 Web 服务的 QoS,是 Web 服务应用领域亟待解决的问题。

目前关于 Web 服务 QoS 预测的研究还处于初期阶段。文献[3,4]基于协同过滤思想设计了 QoS 预测方法,该方法以消费者的历史经验为基础,计算消费者之间以及服务之间的相似度,并以此相似度为基础对消费者未使用过的服务的 QoS 进行预测。文献[5]基于免疫系统的多信号机制提出了一种服务提供者主动的实时 QoS 预测模型,但该预测模型只给出了服务信誉度的预测方法,没有给出其他重要 QoS(比如

到稿日期:2010-03-24 返修日期:2010-07-23 本文受国家自然科学基金项目(60805022),国家高技术研究发展计划(863)(2007AA01Z178)资助。

刘志中(1981—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为 Web 服务组合、进化算法研究,E-mail:lzzmff@126.com;王志坚(1958—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为软件自动化、软件构件复用;周晓峰(1965—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为软件构件复用、分布式计算;娄渊胜(1968—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为软件测试、软件构件复用;尚 颖(1980—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为高性能计算。

执行时间、可靠性等)的预测方法。文献[6,7]给出了基于BP神经网络的服务QoS预测方法,但BP神经网络容易出现过学习问题;文献[8]给出了一种基于结构方程模型(SEM)的服务QoS预测方法。上述工作在一定程度促进了Web服务QoS预测的研究,但都没有考虑Web服务所在的环境、待处理的业务类型、任务大小对服务QoS的影响,不能动态地预测Web服务在处理具体任务时的QoS。

Web服务的QoS主要包括费用(Cost)、反应时间(Response Time)、可用性(Availability)、可靠性(Reliability)等。服务的费用一般由服务提供商制定。文献[9]指出Web服务的QoS是动态变化的,Web服务的QoS与服务的外界环境、所处理的业务类型、任务大小密切相关。外界环境主要是指支持Web服务运行的Web服务器及网络数据传输率。当Web服务器的负载较低、网络数据传输率较高时,服务的反应时间就会越低,可用性及可靠性也会增强;另外,Web服务的QoS与所处理的业务类型和任务大小也具有相关性。比如,类型相同而大小不同的任务,在处于相同环境下的同一Web服务上的反应时间是不同的,大任务的反应时间会比较长,而小任务的反应时间则比较短;并且,同一个Web服务对于不同类型的任务,它的QoS也不相同;已有的QoS预测方法没有考虑Web服务的外界环境及任务类型、任务大小对服务QoS的影响。为了克服这一不足,本文提出了一种基于事例推理的Web服务QoS动态预测方法。该预测方法依据的前提是:在外界环境相同或相似时,Web服务对于类型和大小相同或相似任务的QoS是相同或相似的。该方法将引起QoS波动的主要因素作为事例中问题描述部分的特征向量。当有新的服务请求到来时,将新任务的特征及Web服务的外界环境信息编制成目标事例,应用事例推理技术来动态地预测Web服务处理新任务时的QoS。实验表明,本文的QoS动态预测方法能够有效地提高Web服务QoS的准确度。

本文第2节介绍事例推理的基本原理;第3节给出基于事例推理的Web服务QoS动态预测方法;第4节是本文的实验部分;最后给出本文工作的总结及对未来工作的展望。

## 2 事例推理的基本原理

事例推理(CBR)是目前人工智能领域比较流行的智能推理技术,由Shank<sup>[10]</sup>等人于1982年首次提出,它基于人类的认知过程,模拟人脑直觉、形象或经验思维的过程,通过类比和联想来解决当前相似问题。CBR在财务困境预测<sup>[11]</sup>、机械故障诊断<sup>[12]</sup>、电力负荷预测<sup>[13]</sup>等领域得到了成功的应用。该推理系统基于两个前提:一是相同或相似的问题有相同或相似的解法;另一个是相同或相似的问题会重复发生。事例推理是一种基于过去经验的推理方法,其推理的过程可描述成一个CBR循环,如图1所示。

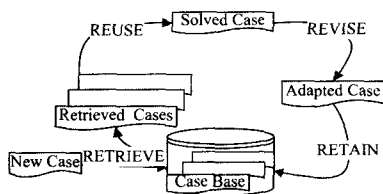


图1 事例推理流程

该循环主要包括4个过程。

(1)检索(Retrieve):将新问题编制成目标事例,从事例库

中检索出一个或多个与目标事例最为相似的历史事例;

(2)重用(Reuse):重用检索到的最佳相似事例的解,生成新问题的解;

(3)修改(Revise):根据反馈信息修正目标事例的解,使其成为新问题的正确解;

(4)保存(Retain):将新问题及其解整理成新事例保存到事例库中,供以后使用。

## 3 基于事例推理的Web服务QoS动态预测

### 3.1 QoS事例的表示

在CBR系统中,事例一般由问题的特征和问题的解组成。在本文中,问题的特征主要有Web服务器的负载(Load)、网络数据传输率(Data Transfer Rate)、任务的类型(Task Type)、任务的大小(Task Size);解向量主要包括Web服务处理任务时的各种QoS。定义Web服务的QoS事例为

$$SC_i = \langle TT_i, Load_i, TS_i, DTR_i \mid q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iz} \rangle$$

Web服务器的负载为在Web服务处理任务期间Web服务器的CPU占用率、磁盘I/O占用率、内存占用率、进程占用率均值和的平均值;网络数据传输率为Web服务处理任务期间数据传输率的均值。对于Web服务QoS预测来说,QoS事例库越完备,预测效果会越好。QoS事例的主要来源有两个:一是在Web服务投入使用之前,需要服务提供商构造尽可能多的场景对Web服务进行充分的测试,将测试用例及测试结果编制成QoS事例存放事例库中;二是在Web服务的使用过程中,记录服务处理每个任务时Web服务器的负载、数据传输率、所处理任务的特征以及相应的QoS,将这些信息整合成QoS事例存放事例库中,以此来完善事例库。

### 3.2 QoS事例的组织

事例推理的原理是依据问题的特征从事例库中找出与新问题最为相似的一个或多个历史事例,利用相似历史事例的解生成新问题的解。因此,相似事例的检索速度对CBR的推理效率影响很大。为了提高事例的检索速度及推理效率,必须合理地组织历史事例。针对Web服务QoS动态预测问题,Web服务器的负载、网络数据传输率、任务类型、任务大小是构成问题特征的重要因素,以这些因素作为索引来合理地组织QoS事例可以提高QoS事例的检索速度。由于不同类型任务之间的QoS不具有可比性,因此首先根据任务类型对事例进行分类;然后依据负载对事例进行归类,将具有相同任务类型、属于同一负载区间的事例存放在一起。这里将负载分为5个区间:

$$0 \leq L_1 \leq 20\%, 20\% < L_2 \leq 40\%, 40\% < L_3 \leq 60\%, \\ 60\% < L_4 \leq 80\%, 80\% < L_5 \leq 100\%$$

最后对具有相同任务类型、属于同一负载区间的事例按照任务的大小进行存储,组织形式如图2所示。

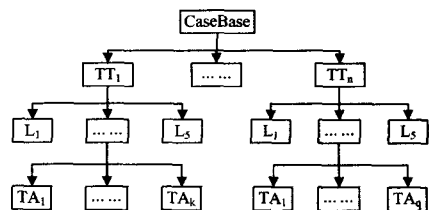


图2 QoS事例组织模型

### 3.3 QoS事例的检索

在收到用户的服务请求后,立即探测Web服务器的负载

及网络数据传输率,结合用户提交的任务类型、任务大小构造目标事例:

$$PC = \langle Load_0, DTR_0, TT_0, TS_0 \mid |q_{01}, q_{02}, \dots, q_{0k}\rangle$$

然后在事例库中依据相似度检索与目标事例最为相似的  $k$  个历史事例。目标事例与历史事例之间的相似度分为局部相似度和全局相似度。局部相似度是目标事例与历史事例中问题特征之间的相似度,全局相似度是局部相似度的加权平均值。文献[14]验证了曼哈顿距离(Manhattan distance)是用来计算局部相似度的最好方法,下面给出本文基于曼哈顿距离的全局相似度计算公式:

$$SIM(sc_0, sc_i) = \frac{sim_1 \cdot w_1 + sim_2 \cdot w_2 + sim_3 \cdot w_3}{w_1 + w_2 + w_3}$$

$$sim_1 = 1 - |Load_0 - Load_i|$$

$$sim_2 = 1 - \frac{|TS_0 - TS_i|}{TA_{max}} \quad (1)$$

$$sim_3 = 1 - \frac{|DT_0 - DT_i|}{DT_{max}}$$

式中,  $TS_{max}, DT_{max}$  分别为 Web 服务所能处理的最大任务量及网络数据传输的最大速率,在计算  $sim_2, sim_3$  时对数据进行了标准化处理,使具有不同度量单位的数据之间具有了可比性。 $w_1, w_2, w_3$  分别为负载、任务大小、网络数据传输率的权重。设检索到的  $k$  个与目标事例最相似的历史 QoS 事例为  $\{SC_1, SC_2, \dots, SC_k\}$ 。

### 3.4 QoS 预测

在检索出最佳相似事例后,依据最佳相似事例中的 QoS 来预测 Web 服务处理新任务时的 QoS。目前在事例重用技术中,依据历史事例的解生成目标事例解的方法主要有最相似事例法<sup>[15]</sup>,即用与目标事例最相似事例的解作为目标事例的解;所有相似事例解的平均值法<sup>[16]</sup>,即对  $k$  个历史事例的解求和后的平均值作为目标事例的解;本文借鉴文献[17]的思想:与目标事例具有较高相似度的事例的解对目标事例的解具有较强影响,给出了以全局相似度为权重的解重用公式:

$$QoS_0 = \frac{\sum_{i=1}^k \delta + Sim_i(\langle SC_0, SC_i \rangle)}{\sum_{j=1}^k (\delta + Sim_j(\langle SC_0, SC_j \rangle))} QoS_i \quad (2)$$

式中,  $QoS_0 = \langle q_{01}, q_{02}, \dots, q_{0k} \rangle$  表示目标事例的 QoS,  $QoS_i = \langle q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iu} \rangle$  表示历史事例  $SC_i$  中的 QoS,  $\delta$  为任意大于 0 的数。将  $k$  个最佳相似事例的 QoS 向量代入式(2)即可得到服务未来的 QoS。

### 3.5 QoS 事例的修正与保存

事例的学习与修正在事例推理系统中具有比较重要的作用。针对 QoS 预测问题,在 Web 服务完成任务后,将 Web 服务的实际 QoS 值与预测值相比较,修正预测值,并将修正后的 QoS 事例保存到事例库中。在 Web 服务投入使用的初期, QoS 事例的数量是有限的,因而需要在 Web 服务的使用过程中不断地形成新的 QoS 事例加入事例库。另外,由于新 QoS 事例的不断加入,必然会使事例库越来越庞大,从而降低事例推理的效率,所以当有新的 QoS 事例要加入事例库时,必须按照一定的规则来添加新事例,管理事例库。QoS 事例库的管理策略描述如下:

(1) 若事例库中没有该 QoS 事例,则加入该事例。

(2) 若该 QoS 事例与事例库中的某个事例的问题特征相同,而两者的 QoS 有所不同,则将两者的 QoS 值相加,再求平均,作为事例的 QoS 值;若该 QoS 事例与所有事例的相似度均小于某个给定的值,则加入该事例,以保证事例库中事例的

相似度按段分布,从而避免事例库的无限膨胀。

(3) 事例库中频繁出现的 QoS 事例则排在事例库的前面。

(4) 消除 QoS 事例的不一致性和冗余性,使事例库处于最佳状态。

### 3.6 基于事例推理的 QoS 预测算法

Step1 依据用户请求信息及 Web 服务的外界环境指数构造目标事例;

Step2 检索出与目标事例具有相同任务类型的历史事例,然后应用二分法确定与目标事例属于同一负载区间的历史事例;

Step3 根据式(1)找出与目标事例最为相似的  $k$  个历史事例;

Step4 根据式(2),利用相似事例的 QoS 来预测目标事例的 QoS;

Step5 依据本文 3.5 节的 QoS 事例库管理策略进行事例的修改与保存。

## 4 实验仿真结果分析

### 4.1 仿真设计

为了验证本文提出的基于事例推理的 Web 服务 QoS 动态预测方法,在校园网上搭建了一个用于教学、新闻、娱乐视频上传、下载的 Web 服务平台,其上运行 Windows 2003 操作系统,网络带宽为 10MB/s。该实验中的任务类型分为上传和下载两种。在实验时,为了模拟 Web 服务器负载的动态性,同时在该 Web 服务器上运行了不同的程序,使其负载具有波动性。实验过程中,记录服务执行每个上传或下载任务时 Web 服务器的负载量、网络数据传输率及任务的大小,在客户端记录任务的反应时间,共收集了 764 条记录,并将这些记录以模板

$$SC_i = \langle TT_i, Load_i, TS_i, DTR_i \mid |q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iu}\rangle$$

整理成 QoS 事例,按照本文 3.2 节的组织形式进行保存。本实验只考虑了反应时间这一 QoS 指标。其他 QoS 指标值的预测方法与该指标的预测方法相同。

### 4.2 实验结果分析

为了验证预测效果,在 764 条事例中,随机抽取 10 条事例作为目标事例,依据本文 3.3 节中的检索方法,找出与每条目标事例最为相似的 5 个历史事例。在计算相似度时,将负载、任务大小、数据传输率的权重分别设为  $w_1 = 0.5, w_2 = 0.3, w_3 = 0.2$ ,依据本文 3.4 节的计算方法,预测目标事例的反应时间,并将预测值与实际值以及传统的度量方法(均值法)进行比较,比较结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,应用本文的预测方法计算出来的 QoS 值准确度较高,比传统的均值度量法精确得多。

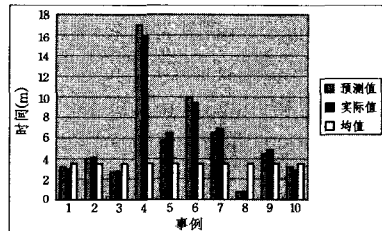


图 3 预测值、实际值及均值的比较

## 参考文献

- [1] 邢少敏,周伯生. SOA 研究进展[J]. 计算机科学, 2008, 35(9): 13-20
- [2] Papazoglou M P, Traverso P, Dustdar S, et al. Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges[J]. IEEE Computer, 2007, 40(11): 38-45
- [3] Tartanoglu F, Issarny V, Levy N, et al. Dependability in the Web service architecture[C]// Architecting Dependable Systems, LNCS 2677. SpringerVerlag, 2003: 89-108
- [4] Medvidovic N, Taylor RN. A classification and comparison framework for software architecture description language[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2000, 26(1): 77-93
- [5] W3C. Web Services Architecture [EB/OL]. <http://www.w3.org/TR/ws-arch/>, 2004
- [6] Miladi M N, Krichen I, Jmaiel M, et al. An xADL extension for management dynamic deployment in distributed service oriented architectures[C]// Proceedings of the Third IPM International Conference on Fundamentals of Software Engineering. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5961. Berlin: Spring, 2009
- [7] Sanz M L, Qayyum Z, et al. Representing service-oriented architectural models using pi-adl[C]// ECSA 2008, LNCS 5292. 2008: 273-280
- [8] 杨鑫, 陈俊亮. WSC/ADL: Web Service 组合系统体系结构描述语言[J]. 软件学报, 2006, 17(5): 1182-1194

- [9] 饶元, 冯博琴, 李尊朝. ALBC4WS: 一种基于软件体系结构生命周期的动态服务合成框架[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(12): 2063-2069
- [10] Jia Xiang-yang, Ying Shi, et al. A New Architecture Description Language for Service-Oriented Architecture[C]// Proceeding of Sixth International Conference on Grid and Cooperative Computing(GCC 2007), Aug. 2007: 96-103
- [11] 蒋哲远, 韩江洪, 王钊. 面向服务软件体系结构的 XML 描述和构造[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(8): 1437-1444
- [12] Castor F F, Brito P H, Rubira C M. Specification of exception flow in software architecture[J]. The Journal of System & Software, 2006, 79(10): 1397-1418
- [13] Feiler P, Rugina A. Dependability Modeling with the Architecture Analysis & Design Language (AADL) [R]. CMU/SEI-2007-TN-043. 2007: 1-76
- [14] de G Castro P A, Rubira C, de Lemos R. A Fault-Tolerant Software Architecture for Component-Based Systems[C]// Architecting Dependable Systems, LNCS 2677. Spring, 2003: 129-149
- [15] de Lemos R, de Castro P A G, Rubira C M. A faulttolerant architectural approach for dependable systems[J]. IEEE Software, 2006, 23(2): 80-87
- [16] Oquendo F.  $\pi$ -ADL: An Architecture Description Language based on the Higher-Order Typed $\pi$ -Calculus for Specifying Dynamic and Mobile software Architectures[J]. Software Engineering notes, 2004, 29(3): 1-14

(上接第 121 页)

**结束语** Web 服务 QoS 的准确性是评价和选择服务的重要依据。为了提高 Web 服务 QoS 的准确度, 本文设计了一种基于事例推理的 QoS 动态预测方法, 首次将引起 Web 服务 QoS 波动的主要因素与服务的 QoS 关联起来, 依据事例推理技术动态地预测 Web 服务处理具体任务时的 QoS, 弥补了已有的 QoS 度量、预测方法只挖掘历史 QoS 数据的规律性而不考虑 Web 服务所在的环境、任务类型、任务大小对 Web 服务 QoS 的影响这一不足。经过试验证明, 本预测方法能够大幅度提高 QoS 的准确性。但本文中的预测方法是即时预测, 即一旦有任务请求就立即开始预测, 不能处理在未来某一时刻点开始调用服务的 QoS 预测问题, 这将是以后研究的重点。

## 参考文献

- [1] Vu L H, Hauswirth M, Aberer K. QoS-based Service Selection and Ranking with Trust and Reputation Management [C]// Proceedings of the International Conference on Cooperating Information System(CoopIS 2005). Agia Napa, Cyprus, 2005: 466-483
- [2] Zeng L Z, Benatallah B, Ngu A H H, et al. QoS-aware middleware for Web services composition [J]. IEEE Trans. on Software Engineering, 2004, 30(5): 311-327
- [3] 邵凌霄, 周立, 赵俊峰, 等. 一种 WebService 的服务质量预测方法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2062-2073
- [4] Zheng Zibin, Ma Hao, Lyu M R, et al. WSRec: A Collaborative Filtering Based Web Service Recommender System [C]// IEEE International Conference on Web services. 2009: 437-444
- [5] 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: 535-539
- [6] 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: 103-105
- [7] Gao Zheng-dong, Wu Geng-feng. Combing QoS-based Service Selection with Performance Prediction [C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on e-Business Engineering (ICEBE'05)
- [8] Li Mu, Huai Jin-peng, Guo Hui-peng. An Adaptive Web Service Selection Method Based on the QoS Prediction Mechanism [C]// IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology-Workshops. 2009
- [9] Hwang San-yih, Wang Hao-jun, Tang Jian, et al. A probabilistic approach to modeling and estimating the QoS of Web service-based workflows[J]. Information Sciences, 2007, 177: 5484-5503
- [10] Schank R. Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computers and People [M]. Cambridge University Press, 1982
- [11] Li Hui, Sun Jie, Sun Bo-liang. Financial distress prediction based on OR-CBR in the principle of k-nearest neighbors [J]. Expert System with Applications, 2009, 36: 643-659
- [12] Varma A, Roddy N. ICARUS: design and development of a case-based reasoning system for locomotive diagnostics [J]. Engineering. Applications of Artificial Intelligence, 1999, 12(6): 681-690
- [13] 屈利, 苑津莎, 李丽. 基于事例推理的电力系统短期负荷预测[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(2): 59-63
- [14] Sankarkp S. Foundations of soft case based reasoning [M]. New York: Wiley, 2003
- [15] Walkerdren F, Jeffery D R. An empirical study of analogy-based software effort estimation [J]. Empirical Software Engineering, 1999, 4: 135-158
- [16] Shepperd M, Schofield C. Estimating software project effort using analogies [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1997, 23: 736-743
- [17] Kadoda G, Cartwright M, Chen L, et al. Experiences using case based reasoning to predict software project effort [C]// Proceedings EASE 200 Conferences. Keele, UK, 2000