

一种 Web 服务的 QoS 抽象模型和评估方法

肖芳雄^{1,2} 李 燕² 张君华³ 祝 义⁴ 朱小栋⁵

(华南理工大学软件学院 广州 510006)¹ (广西财经学院信息与统计学院 南宁 530003)²

(宁波大学职业技术教育学院 宁波 315100)³ (江苏师范大学计算机学院 徐州 221116)⁴

(上海理工大学管理学院 上海 200093)⁵

摘 要 目前 Web 服务研究中关注的 QoS 属性较多,且属性值的评估方法随应用领域和组织机构的不同差异较大,这不利于以一致的方式来评估 Web 服务的 QoS。从抽象的角度在众多 QoS 属性中提炼出时间、概率、代价 3 种抽象 QoS 属性,并在此基础上给出了 QoS 多属性归一化处理方法和多属性综合评估方法,以支持在模型层面以一致的方式评估 Web 服务的 QoS,以及 QoS 优化的 Web 服务选取。

关键词 模型,评估,服务质量,Web 服务

中图法分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.11.020

Model and its Evaluation Method for QoS of Web Services

XIAO Fang-xiong^{1,2} LI Yan² ZHANG Jun-hua³ ZHU Yi⁴ ZHU Xiao-dong⁵

(School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)¹

(School of Information and Statistics, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003, China)²

(Vocational Education Faculty, Ningbo University, Ningbo 315100, China)³

(College of Computer, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)⁴

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)⁵

Abstract We proposed an abstract QoS model that includes only three abstract properties to cover all concrete QoS properties, i. e., time, cost and probability, from views of practice and conciseness. We also proposed approaches for handling and evaluating the abstract properties in unique way, which support evaluating QoS of Web services in consistent and unambiguous way in abstract model level, and selecting Web service with optimal QoS.

Keywords Model, Evaluation, QoS, Web service

1 引言

Web 服务目前已经成为应用集成的新解决方案。Web 服务 QoS 属性是 Web 服务的内在因素。由于 Internet 的易变性和动态性,以及 Web 应用领域的复杂性和多样性,在 Internet 上提供具有恰当 QoS 的 Web 服务成为一个重要的挑战,Web 服务 QoS 成为决定 Web 服务能否成功的重要因素。

其次,从 Web 服务组合的角度看,如何从大量的 Web 服务中选择合适的 Web 服务进行组合,以使得 Web 组合服务的 QoS 满足需求,也是 Web 服务组合研究中的一个重要问题。因此,在实施 Web 服务组合前,需要建立 Web 服务的 QoS 模型并进行评估。

此外,从建立面向 QoS 的 Web 服务组合建模和验证框架的角度,也需要从 Web 服务众多的 QoS 属性中提炼出适合 UML 语言和形式化语言扩展的抽象属性。

本文第 2 节分析 Web 服务 QoS 模型的研究现状和存在

的问题;第 3 节给出 Web 服务 QoS 抽象模型及评估方法;第 4 节是案例分析;第 5 节是相关工作比较;最后是结束语。

2 Web 服务 QoS 模型的研究现状和问题分析

Web 服务的 QoS 在不同的领域有着不同的含义,不同组织从不同的角度对 QoS 进行了定义。

ISO8402 标准给出的 QoS 定义为质量是有关实体的一组特性的总和,这些特性反映了该实体满足明确规定或隐含需求的能力^[1]。随后,ISO9000 标准取代了 ISO8402,将 QoS 定义为:一组固有特性满足要求的程度,QoS 决定用户对特定服务的满意程度^[2]。

ITU-T 建议 E. 800 给出的 QoS 定义为:“决定业务用户满意程度的业务性能综合效果”^[3]。ITU-T 建议 G. 1000,扩展了 E. 800,把业务性能与相应的网络性能联系起来^[4]。

IETF 将 QoS 定义为:“QoS 是网络在传输数据流时需要满足的一系列服务要求,用带宽、分组延迟和分组丢失率等描

到稿日期:2013-09-01 返修日期:2013-11-01 本文受国家自然科学基金(61262002),广西高校科学技术研究基金(2013ZD060)资助。

肖芳雄(1971-),男,博士,副教授,主要研究领域为软件工程、云计算、大数据,E-mail: xiao.fangxiong@gmail.com;李 燕(1972-),女,硕士,讲师,主要研究领域为软件工程、软件质量分析和项目管理;张君华(1970-),男,博士,副教授,主要研究领域为软件工程、实时概率系统建模和分析;祝 义(1976-),男,博士,副教授,主要研究领域为软件工程、软件建模和验证;朱小栋(1981-),男,博士,讲师,主要研究领域为数据挖掘、电子商务。

述的关于分组传输的质量”^[5]。

目前,业界比较认可的 Web 服务 QoS 的定义是对 W3C 的 Web 服务定义,以及国际标准 ISO8402 和 ITU E. 800 的 QoS 定义的综合,即:“Web 服务的 QoS 主要体现的是一种 Web 服务使用者对 Web 服务的感知效果”^[6]。

目前,已有一些 Web 服务的 QoS 模型被提出^[7-15]。

Web 服务级别协议 SLA(Service Level Agreement)^[9]是衡量 Web 服务 QoS 标准的研究成果之一。SLA 是一个关于 Web 服务 QoS 担保的协定,遵循 SLA 的 Web 服务的资源可进行配置,以提供满足特定需求的服务级别。比如,某个 Web 服务可通过为不同的 Web 服务请求动态分配资源,来为不同的用户提供不同的服务级别。因此,用户在请求 Web 服务的时候,为确保服务级别达到要求,可以声明一个与 Web 服务相关联的 SLA。Web 服务的服务级别定义了该服务应达到的性能,其性能度量有可用性、吞吐量、响应时间等。

文献[10]从 Web 服务使用者角度出发,提出 Web 服务 QoS 主要包括正确性(Accuration)、可靠性(Reliability)、可用性(Availability)、可达性(Accessibility)、安全性(security)、完整性(Integrity)、性能(Performance)、规范性(Regulation)、鲁棒性(Robustness)等方面的需求。文献[7]从 Web 服务属性和 Web 服务质量相结合的角度,认为 Web 服务的 QoS 包括响应时间、安全性、可用性、吞吐量等。文献[8]提出的 Web 服务 QoS 模型包括响应时间、服务价格、可用性、信誉度、可靠性等,它从 Web 服务的非功能特性的角度描述了 Web 服务 QoS 属性。文献[11]认为 Web 服务 QoS 模型应该包括可用性、服务价格、可靠性、信誉度等。文献[12]提出了一个可扩展的 QoS 属性模型,包括的 QoS 属性有价格、执行时间、信誉度等。文献[13]提出了与安全性(security)相关的 QoS 属性,包括真实性(Authentication)、机密性(Confidentiality)、完整性(Integrity)等多个方面。

虽然 Web 服务的 QoS 属性有很多,但从服务使用者的角度,以及准确性和实用性的角度,服务执行时间、服务费用、可靠性、可用性、满意度等被较多地关注,下面是其定义^[8]:

①服务执行时间(Time)

服务的执行时间 T_s 等于请求发送的瞬间到结果被收到的瞬间之间这段时间。

②服务费用(Cost)

服务的执行费用 C_s 是指作为服务使用者请求执行该服务要付出的费用。

③可靠性(Reliability)

服务的可靠性 R_s 是一个请求在最大期望时间内被正确响应的概率,其表达式为:

$$R_s = N_s / N_t$$

其中, N_s 表示服务在观察时间内被成功调用的次数, N_t 表示在观察时间内调用服务 S 的总次数。

④可用性(Availability)

服务的可用性是服务可使用的概率,其计算公式为:

$$A_s = T_s / \lambda$$

其中, λ 是根据服务的类型设置的常量, T_s 是服务在 λ 时间内可用的时间。

⑤满意度(Satisfaction)

服务的满意度是对服务满意程度的衡量,其度量主要来

自服务使用者对服务的使用经验。不同的服务使用者可能对同一个服务评价不同,因此采用服务使用者给出的平均等级来衡量满意度 S_s 的值,其计算公式为:

$$S_s = \sum_{i=1}^n S_{s_i} / n$$

其中, S_{s_i} 是服务使用者给服务 s 的第 i 次评价分数, n 是服务 s 被评价的次数。

通过分析,可以看出目前 Web 服务 QoS 模型研究中存在着一些问题,表现为如下几点:

(1) Web 服务的 QoS 在不同的组织、不同的领域有不同的认识和定义,不利于 Web 服务 QoS 的一致评估。

(2) Web 服务 QoS 属性的测量和计算应考虑以下一些因素:

- 谁来测量:是服务的提供者、使用者,还是第三方独立机构;

- 如何测量:是人工测量,还是利用工具测量;

- 何处测量:是在 Web 服务的访问点,还是使用者处。

对这些问题,目前大多数研究没有给出明确的定义,从而造成 QoS 测量值和计算值的差异较大,不利于 Web 服务 QoS 的一致评估。

(3) 目前大多数 Web 服务 QoS 模型定义的 QoS 属性众多,不可能把这些 QoS 属性一一扩展进 UML 语言和形式化语言中。

3 Web 服务 QoS 抽象模型及评估

针对上述 Web 服务 QoS 模型研究中存在的问题,本文从建立面向 QoS 的 Web 服务组合建模和分析验证的角度,从现有 Web 服务众多的 QoS 属性中提炼出适合 UML 语言和形式化语言扩展、同时尽可能覆盖现有 Web 服务 QoS 属性的 QoS 抽象属性,并给出综合评估方法。

本文提出 QoS 抽象属性,基于如下原因:

(1) 把 QoS 属性扩展进 UML 语言和形式化语言,需要对 QoS 属性进行抽象。从建模的角度,UML 语言和形式化语言都是抽象层面的建模语言,相应地,当把 QoS 属性扩展进这两种语言时,需要抽象 QoS 属性。

(2) 现有 Web 服务 QoS 的具体属性众多,不可能一一扩展进 UML 语言和形式化语言,需要进行提炼。如前文所述,现有 Web 服务 QoS 模型一般都包含众多的属性,比如文献[15]提出的模型包含了 11 个 QoS 属性,不可能把如此众多的 QoS 属性一一扩展进 UML 语言和形式化语言,因此需要从中提炼出适合 UML 语言和形式化语言扩展、同时尽可能覆盖现有 Web 服务 QoS 属性的抽象属性。

(3) 现有 Web 服务 QoS 定义、测量、计算方法各异,需要进行统一。如前文所述,Web 服务的 QoS 在不同的组织、不同的领域,其定义、测量和计算方法差异较大,不利于 Web 服务 QoS 的一致评估。抽象的 QoS 属性可以在模型层面避免这些问题,从而在模型层面实现 Web 服务 QoS 的一致评估。

为此,本文提出如下 QoS 抽象属性:

(1) 抽象时间属性

服务的时间是一个重要的 QoS 属性,现有 Web 服务 QoS 模型研究都把时间纳入到 QoS 模型中,服务的时间可分为服务响应时间、服务延迟时间、服务执行时间等。如前所述,对于服务时间值的测量和计算,因测量机构、测量方法、测量地

点、计算方法的差异较大。本文提出抽象的时间属性,在抽象模型层面,将不区分服务时间的类型,即不区分服务响应时间、服务延迟时间、服务执行时间等;而对于时间值的测量和计算,假定与测量机构、测量方法、测量地点、计算方法无关。当把抽象 QoS 模型应用于某一具体 Web 服务时,再把抽象时间映射为具体时间。

(2) 抽象概率属性

如前文所述,现有 Web 服务 QoS 属性中的可靠性、可用性、满意度等属性,是用统计概率来定义和计算的,为此,提出用一个抽象的概率属性来表示这些属性。当关注某个具体的与概率相关的属性时,可把该具体的概率属性映射到一个抽象概率属性,当有多个具体概率属性需要分析时,可分别映射到多个抽象概率属性。本文在此讨论一个抽象概率属性的情况,抽象概率属性的原理可推广到多个抽象概率属性。

(3) 抽象代价属性

需要说明的是,本文中代价是一个抽象的概念,泛指对资源的消费。本文中资源也是一个抽象的概念,泛指软件在完成的过程中消费的各种资源,包括但不限于处理器时间、内存、外存、功耗、带宽等。与抽象时间属性类似,当把抽象 QoS 模型应用于某一具体 Web 服务时,应把抽象代价映射为具体代价。

综上,得到 Web 服务的 QoS 抽象模型为如下定义:

定义 1 Web 服务的 QoS 抽象模型是一个三元组 $Q(s) = (T_s, P_s, C_s)$, 其中, T_s, P_s, C_s 分别表示服务 s 的抽象时间属性、抽象概率属性、抽象代价属性。

(1) QoS 属性表示

建立 Web 服务 QoS 抽象模型后,本文在文献[11-13]的 QoS 计算模型的基础上,提出一个基于 QoS 抽象属性的 Web 服务 QoS 属性表示模型,该模型能支持 QoS 属性的扩展,使得质量属性的添加与删除不影响 QoS 计算架构,并能通过该模型计算出具有最优 QoS 质量的 Web 服务。

在 Web 服务组合的流程建模和设计阶段,对于某个任务 t , 如果存在 n 个满足功能需求但 QoS 不同的可选 Web 服务,可分别建立这些 Web 服务的 QoS 抽象模型,并用矩阵表示如下:

$$Q = \begin{Bmatrix} Q_{1,1} & Q_{1,2} & Q_{1,3} \\ Q_{2,1} & Q_{2,2} & Q_{2,3} \\ \dots & \dots & \dots \\ Q_{n,1} & Q_{n,2} & Q_{n,3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_{s_1} & P_{s_1} & C_{s_1} \\ T_{s_2} & P_{s_2} & C_{s_2} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{s_n} & P_{s_n} & C_{s_n} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式(1)将满足任务 t 功能需求的可选 Web 服务的 QoS 属性表示为一个可扩展的矩阵 Q , 矩阵的行表示某个 Web 服务 QoS 的各个属性值,矩阵的列表示某种质量属性的 QoS 值,比如 $T_{s_1}, P_{s_1}, C_{s_1}$ 分别表示第一个 Web 服务的抽象时间、抽象概率、抽象代价属性。式(1)将满足任务 t 功能需求的可选 Web 服务的 QoS 属性统一表示,并支持 Web 服务 QoS 属性的可扩展性:当增加一个 Web 服务的 QoS 属性值时,则为矩阵新增一行;当新增一个 QoS 属性时,则为矩阵新增一列;当不需要某个 QoS 属性时,则删除矩阵中对应的列。

(2) QoS 归一化处理

当把满足任务功能需求的可选 Web 服务的 QoS 属性表示为矩阵后,需要对每个可选 Web 服务的多个 QoS 属性值给出综合评价,以找到综合 QoS 最优的 Web 服务。由于各

QoS 属性值的表述方式不一,量化单位各异,这使得多个 QoS 属性间的比较缺乏一个统一的基础。因此,首先需要归一化处理 Web 服务的 QoS 属性。Web 服务 QoS 的归一化处理是先将各项 QoS 属性去量纲,即通过数量变换,消除量纲和数量级对 QoS 属性的影响,使 QoS 属性实际值转化为评价属性值,具体介绍如下。

根据 QoS 属性值大小对 QoS 质量高低的不同影响,将 QoS 属性分为两类:增量型 QoS 属性和减量型 QoS 属性。

① 增量型 QoS 属性

这类 QoS 属性是指属性值越大,质量也就越高。比如可靠性、可用性、信誉度等。Web 服务 QoS 抽象模型中的抽象概率属性就属于增量型 QoS 属性。

对增量型 QoS 属性,其属性值的归一化计算公式如下:

$$V_{i,j} = \begin{cases} \frac{Q_{i,j} - Q_j^{\min}}{Q_j^{\max} - Q_j^{\min}}, & \text{if } Q_j^{\max} - Q_j^{\min} \neq 0 \\ 1, & \text{if } Q_j^{\max} - Q_j^{\min} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

② 减量型 QoS 属性

这类 QoS 属性是指属性值越大,质量也就越低。Web 服务 QoS 抽象模型中的抽象时间属性和抽象代价属性就属于减量型 QoS 属性。

对减量型 QoS 属性,其属性值的归一化计算公式如下:

$$V_{i,j} = \begin{cases} \frac{Q_j^{\max} - Q_{i,j}}{Q_j^{\max} - Q_j^{\min}}, & \text{if } Q_j^{\max} - Q_j^{\min} \neq 0 \\ 1, & \text{if } Q_j^{\max} - Q_j^{\min} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中, Q_j^{\max} 是质量矩阵 Q_i 中第 j 列 QoS 属性的最大值, $Q_j^{\max} = \text{Max}(Q_{i,j}), 1 \leq i \leq n$, 而 Q_j^{\min} 是第 j 列 QoS 属性的最小值, $Q_j^{\min} = \text{Min}(Q_{i,j}), 1 \leq i \leq n$ 。

(3) QoS 多属性评估

当把矩阵中的 QoS 属性值归一化处理后,使用权重机制来计算每个服务的综合质量,为此需要为矩阵中的每列质量属性提供权重。每列质量属性的权重 $W_j (j=1, 2, \dots, n)$ 可由用户指定,或由系统默认给出。下面给出计算每个服务综合质量的公式:

$$\text{Score}(s_i) = \sum_{j=1}^n V_{ij} \times W_j \quad (4)$$

其中, $W_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n W_j = 1$ 。式中的 $\text{Score}(s_i)$ 表示服务 s_i 的 QoS 属性综合值, W_j 表示第 j 个质量属性的权重。

综上,选择 QoS 综合质量最优的 Web 服务公式为:

$$S_{\text{best}}(t) = \text{Max}(\text{Score}(s_i)) \quad (5)$$

4 案例分析

本文作者在文献[16]给出了 Web 服务组合案例,该案例中到达服务组合成功状态的路径有 4 条: Path1-Path4, 运用本文提出的多属性综合评估方法,可以对这些路径进行时间、概率、功能代价、计时代价的多属性进行综合评价。

设 4 条路径构成的时间、概率、功能代价、计时代价的 QoS 矩阵为:

$$Q = \begin{Bmatrix} 25 & 0.126 & 11 & 115 \\ 25 & 0.252 & 12 & 115 \\ 24 & 0.252 & 12 & 116 \\ 24 & 0.216 & 11 & 116 \end{Bmatrix}$$

其中,概率为增量型质量属性,时间、功能代价、计时代价

为减量型质量属性,则其 QoS 归一化矩阵为:

$$Q' = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.714 & 11 & 0 \end{Bmatrix}$$

设系统默认或用户给定的时间、概率、功能代价、计时代价的权重为:

| | | | |
|-----|-----|------|------|
| 时间 | 概率 | 功能代价 | 计时代价 |
| 0.4 | 0.3 | 0.05 | 0.25 |

则 Path1-Path4 的 QoS 综合评分为:

| Path | Score |
|------|-------|
| 1 | 0.3 |
| 2 | 0.55 |
| 3 | 0.7 |
| 4 | 0.664 |

由此可以看出,Path3 的 QoS 综合评分最高,而 Path3 表明 TAgent 选择与 AirlineA 和 Hotel 进行组合,其评分最高的原因在于其时间、概率的质量较好,其时间、概率所占的权重较高。因此,模型将给出 TAgent 与 AirlineB 和 Hotel 进行组合的建议。

5 相关工作比较

目前,Web 服务 QoS 模型由不同的组织在不同的领域提出,因此存在不同的认识和定义,不利于 Web 服务 QoS 的一致评估。而且大多数研究没有给出明确的定义,造成 QoS 测量值和计算值的差异较大,不利于 Web 服务 QoS 的一致评估。此外,目前大多数 Web 服务 QoS 模型定义的 QoS 属性众多,不利于 QoS 的抽象建模。

本文从建立 Web 服务组合统一建模和验证框架的角度,提出 Web 服务 QoS 抽象模型包括时间、概率、代价 3 种抽象属性,并给出了相应的 QoS 综合评估方法,在模型层面上支持 Web 服务 QoS 的一致评估,也更适合于扩展进 UML 语言和形式化语言中。

结束语 本文介绍了 Web 服务 QoS 模型的研究现状,分析了研究中存在的问题。从建立面向 QoS 的 Web 服务组合建模和验证框架的角度出发,在 Web 服务众多的 QoS 属性中提炼出适合 UML 语言和形式化语言扩展的抽象时间属性、抽象代价属性和抽象概率属性。在此基础上,给出了基于抽象属性的 Web 服务 QoS 多属性归一化处理方法和多属性综合评估方法,支持在模型层面以一致的方式评估 Web 服务的 QoS,以及 QoS 最优的 Web 服务选取。本文提出的抽象时间属性、抽象代价属性和抽象概率属性将分别扩展进 UML

语言和形式化语言中,并用扩展的 UML 语言和形式化语言来建模和验证 Web 服务组合。

参考文献

- [1] International Organization for Standardization. ISO/TC 8402-1994, Quality management systems-Fundamentals and vocabulary; Terms and definitions [S]. USA: American National Standards Institute, 1994
- [2] International Organization for Standardization. ISO/TC 9000-2000, Quality management systems-Fundamentals and vocabulary; Terms and definitions [S]. USA: American National Standards Institute, 2000
- [3] International Telecommunication Union. ITU / T E. 800-1994, Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability [S]. USA: American National Standards Institute, 1994
- [4] Shenker S, Wroclawski J. Network element service specification template, IETF RFC 2216 [R]. USA: IETF RFC Editor, 1997
- [5] Crawley E, Nair R. A framework for qos-based routing in the Internet, IETF RFC 2386 [R]. USA: IETF RFC Editor, 1998
- [6] W3C. Web services activity [OL]. <http://www.w3.org/2002/ws/>
- [7] <http://www.developer.com/services/article.php/2027911/Quality-of-Service-for-Web-ServicesdashDemystification-Limitations-and-Best-Practices.htm>
- [8] Zeng Liang-zhao, et al. QoS-Aware Middleware for Web Services Composition [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(5): 311-327
- [9] <http://www.ibm.com/developerworks/library/ws-slafram>
- [10] <http://www.w3c.or.kr/kr-office/TR/2003/ws-qos/>
- [11] Sullivan O J, Edmond D. What's in a Service [J]. Journal of Distributed and Parallel Databases, 2002, 12(23): 117-133
- [12] Liu y, Ngu A H, Zeng L. QoS Computation and Policing in Dynamic Web Service Selection [C] // Proceedings of the 13th International Conference on World Wide Web, ACM Press. USA, 2004, 66-73
- [13] Dromey R G. Connering the Chimera [J]. IEEE Software, 1996, 13(1): 33-43
- [14] McCall J A, Richards P G. Factors in Software Quality [R]. New York, USA: National Technical Informantion Service, 1977
- [15] Maximilien E M, Singh M P. A framework and ontology for dynamic Web Service selection [J]. IEEE Internet Computing, 2004, 8(5): 84-93
- [16] 肖芳雄, 李燕, 黄志球, 等. 基于时间概率代价进程代数的 Web 服务组合建模和分析 [J]. 计算机学报, 2012, 35(5): 918-936
- [17] De Nicola R, Hennessy M C B. Testing equivalences for processes [J]. Theoretical Computer Science, 1984, 34(1): 83-133
- [18] Van Glabbeek R J, Weijland W P. Branching time and abstraction in bisimulation semantics [J]. JACM, 1996, 43(3): 555-600
- [19] Plotkin G. A structural approach to operational semantics [J]. Journal of Logic and Algebraic Programming, 2004(60): 17-139
- [20] Chen Tao-lue. Clocks, dice and processes [D]. Dutch: Universiteit van Amsterdam, 2009
- [21] 王精明, 虞慧群. 基于安全进程代数的非演绎安全模型的分析与验证 [J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 56-58

(上接第 102 页)

- [10] Aceto L, Fábregas I, De Frutos Escrig D, et al. Relating modal refinements, covariant-contravariant simulations and partial bisimulations [M] // Fundamentals of Software Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 268-283
- [11] Hennessy M C B, Milner R. Algebraic laws for nondeterminism and concurrency [J]. JACM, 1985, 32(1): 137-161
- [12] Glabbeek R J. The linear time-branching time spectrum II [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Concurrency Theory. Springer-Verlag, 1993: 66-81