

## 基于马尔科夫决策过程的可适应业务流程建模及分析

张红霞<sup>\*①②</sup> 邹华<sup>①</sup> 林荣恒<sup>①</sup> 杨放春<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

<sup>②</sup>(中国石油大学计算机与通信工程学院 青岛 266580)

**摘要:** 研究移动网络的适应业务流程的建模和模型分析对于部署和执行 Web 服务应用有着重要的意义。该文通过定义业务流程的相似性及数据类型的相容性,为可适应应用提供了候选集合,使得业务流程能够根据环境的变化动态地进行适应。为了有效地对适应业务流程实例进行分析,该文提出基于马尔科夫决策过程模型的适应业务流程建模方法,采用随机模型检测技术对模型的合理性进行验证和预测。针对具体实例,采用该文提出的方法对视频传输应用进行建模和分析验证,实验结果表明,该文为适应业务流程的建模和分析验证提供了一种有效的方法。

**关键词:** 移动网络; 业务流程; 马尔科夫决策过程; 概率计算树逻辑; 随机模型检测

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1760-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01413

## Adaptive Business Process Modeling and Analyzing Based on Markov Decision Process

Zhang Hong-xia<sup>①②</sup> Zou Hua<sup>①</sup> Lin Rong-heng<sup>①</sup> Yang Fang-chun<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(State Key Laboratory of Networking & Switching Technology, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

<sup>②</sup>(College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Research on modeling and analyzing adaptive business processes based on Web services is very important for developing and deploying applications in the mobile Internet. In order to modeling and verifying the reliability and adaptability of services effectively, in this paper, a probabilistic approach is proposed to formally describe and analyze the reliability properties of adaptive business processes. First, based on the semantic similarity of services and compatibility of data types, which provide candidate set for the adaptable application, and business processes can be adaptive according to the change of circumstance. Then, the probabilistic model checking is used to analyse the soundness and reliability of adaptive business processes. Finally, an video transfer application is modeled and verified based on the proposed method, which shows that the approach provides an effective underlying guideline for modeling and analyzing adaptive applications in the mobile Internet.

**Key words:** Mobile network; Business process; Markov Decision Process (MDP); Probabilistic computation tree logic; Probabilistic model checking

### 1 引言

随着 Web 服务技术的发展,通过服务组合来快速有效地为移动网络用户提供满足需求的应用已经成为必然趋势。但由于移动网络环境的开放性和动态性以及 Web 服务的随机性,导致服务的执行具有很强的不确定性,从而影响了服务质量和用户体验<sup>[1]</sup>。

在移动网络环境下,一次应用执行将涉及多个异构的网络服务节点和终端,应用执行过程中可能无法找到合适的网络服务来保证应用执行的连续性时,就需要通过支持适应的服务选择方法寻找合适的候选服务节点,实施业务流程的适应重构调整,维持应用的执行,尽可能地保证服务质量。特别是在战场环境下,服务节点可能因敌军破坏而导致数量较少,不同作战单位之间大量的视频通信需求又加重了剩余服务节点的负载,导致视频内容传输延迟增大,通信质量严重下降。为此,服务适应技术可以将视频通信降级为语音通信,维持作战单位之间的基本通信过程,保证作战命令的及时下达。所

2012-11-08 收到, 2013-03-15 改回

国家 973 规划项目(2009CB320406)和国家 863 计划项目(2011AA01A102)资助课题

\*通信作者: 张红霞 zhanghx10@gmail.com

以,如何准确地度量移动网络下 Web 服务的不确定性以及动态地对其进行自适应管理,研究高可靠的服务适变方法对有效提供服务有着重要的现实意义。

近年来,针对移动网络的动态和不可靠环境的 Web 服务提供,文献[2-4]采用多属性决策理论和 QoS 评估方法对非功能属性的不确定性进行了研究,但是并没有考虑当服务功能性需求不能满足时应该如何进行自适应处理。针对不可靠网络中的应用系统,文献[5]提出了一种可信的自适应服务组合机制,将组合服务的可靠性保证问题转换为适应控制问题,在马尔科夫决策过程框架下建模和优化组合服务,实现了基于强化学习的直接自适应控制机制,使得服务具有自适应维护能力。文献[6]提出了基于 BPEL 语言的一种自适应语言 VxBPEL,通过引入变化点等新的元素,使得流程能够进行自适应并得到相应的变体,并且允许在运行时引入新的变体,避免流程的重新部署。文献[7]提出了一种适变描述模型,采用集合论的方法分析应用中服务节点或通信内容的变化行为,并判断相关服务节点能力的变化情况给出功能节点选择策略,保证服务提供的连续性。以上研究都没有考虑组合服务的正确性和合理性,未给出有效的验证机制。针对服务的正确性和合理性验证,随机模型检测技术被广泛应用于 Web 服务的行为分析和验证<sup>[8-10]</sup>。文献[11]提出了一种新的体系结构对业务流程及其变化进行建模和管理,该方法基于明确表示服务组合中各服务之间的关系。采用 TPN(Time Petri Net)对业务流程进行建模,基于 Romeo 插件构建平台对模型进行分析验证,但这些模型的建立过程中并未考虑到适变因素和不可靠性。

那么,如何刻画基于 Web 服务的应用在执行过程中的不确定因素,以及业务流程的动态变化,快速得到能够适应环境动态变化的运行时业务流程,并且保证流程的正确性和合理性是需要解决的问题。针对以上各参考文献的不足,本文提出了基于业务流程相似性和数据类型相容性的适变方法,业务流程相似性从静态角度在应用执行之前提供了应用可适变的候选集合,数据类型相容性从动态角度保证了应用执行过程中的无缝适变。采用马尔科夫链对业务流程中的不可靠性进行建模,为了对适变业务流程的合理性、正确性以及资源消耗进行分析验证,基于马尔科夫决策过程对适变业务流程进行统一建模,采用概率计算树逻辑公式对整个业务流程的功能和非功能性属性进行描述。最后利用概率模型检测技术和 PRISM 工具对适变业务流程进行

分析和验证。实验结果表明,本文的研究提供了一种运行时业务流程适变的机制,并为适变业务流程的建模和分析验证提供了有效的方法。

本文第 2 节结合具体场景,给出了具有可靠性的业务流程的定义;第 3 节根据业务流程功能的相似度和相容性,提出了适变业务流程建模方法;第 4 节采用随机模型检测技术对适变业务流程进行定量和定性分析;最后是结束语。

## 2 业务流程模型

基于 Web 服务的应用按照预定义的业务流程执行,在移动网络中,由于外部环境、用户需求以及接入网络的不断变化,导致业务在执行的过程中有可能会出现问题,当用户需求变化或用户访问量大的时候,导致网络传输出现故障等问题。此时如何对执行过程中的不可靠性以及采取各种方法保证应用执行的连续性,最大可能地为用户提供服务是需要考虑的问题。本节通过讨论具体的实例来详细阐述具有可靠性的业务流程模型。

例如,当用户 A 到旅游胜地旅游,拍摄了一段视频资料,希望通过手机,利用视频传输服务,将视频传输给用户 B,用户 B 可以采用流化的方式实时接收视频,也可以采用先下载后观看的方式接收视频。因此,整个的视频传输业务需要经过压缩,编码,上传,流化或下载到达最终用户 B。而在整个过程中,由于网络的复杂情况,导致上传,下载,流化操作都有可能发生错误。

服务的可靠性指 Web 服务在一段时间内被成功执行的可能性<sup>[4]</sup>。为了在具体的业务流程中体现操作的可靠性,我们引入 OP 表示所有操作集合,OT 表示所有操作类型集合, $op_1 : O_1$  表示操作  $op_1 \in OP$  的操作类型为  $O_1 \in OT$ 。函数  $\text{succ} : OP \rightarrow [0,1]$  表示任意业务操作  $op \in OP$  被成功执行的概率,那么操作执行失败的概率为  $1 - \text{succ}(op)$ 。为了描述业务流程的功能,引入文本标记集合  $\Omega$  表示所有业务流程功能描述的文本集合,每个业务流程都有一个标记文本。AP 表示固定的有限原子谓词集合用于标记状态上的相关属性。采用离散时间马尔科夫链对具有可靠性的业务流程进行描述。

**定义 1** 一个具有可靠性的业务流程模型是 6 元组  $RBP = (S, s_0, \text{Act}, \text{Tr}, L, \text{succ}, l)$ , 其中,  $S$  是状态的有限集合,  $s_0 \in S$  是初始状态,  $\text{Act} \subseteq \{O? | O \in OT\} \cup \{O! | O \in OT\} \cup \{\tau\}$  是动作集合,  $\{\tau\}$  表示流程内部的动作集合,  $\text{Tr} \subseteq S \times \text{Act} \times S$  是变迁集合,  $L : S \rightarrow 2^{\text{AP}}$  是状态标记函数,为每个状态  $s \in S$  指定在该状态处可接受的原子谓词集合  $L(s)$ , 其中

AP 表示固定的有限原子谓词集合用于标记状态上的相关属性。succ : Tr → [0,1] 是变迁转移成功函数，为每个变迁指定成功转移的概率， $l \in \Omega$  是业务流程的文本标记信息。

根据可靠服务的业务流程模型得到视频传输服务的简单模型如图 1 所示。

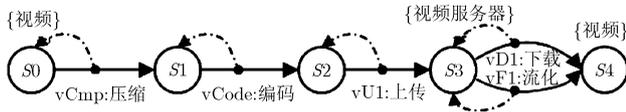


图1 视频服务的可靠业务流程模型

### 3 可适变业务流程模型

由于应用在执行过程中存在不可靠性因素，为了最大可能地满足用户的需求，需要业务流程具有适变能力，能够根据移动网络和终端的环境变化，在应用执行失败时采用其他方式尽最大可能保证服务的连续提供。因此本节将语义相似的应用进行统一管理，要求业务人员在设计和定义应用的同时，给出相似应用的评判标准，作为业务流程适变的基础。当应用执行失败时，语义相似的应用作为候选应用提供适变支持。将具有相容数据操作类型的状态作为相似业务流程之间转换依据，在业务流程执行过程中，动态地根据上下文环境在相似业务流程之间进行转换，从而为用户提供连续的服务。为了更进一步对适变业务流程实例进行统一的分析和验证，基于马尔科夫决策过程对具有适变能力的业务流程模型进行定义。

#### 3.1 业务流程的相似性度量

我们认为应用在执行过程中仅能在功能相似的应用之间进行切换，否则即使提供了服务也无法实现用户本身的意图，例如，上述视频传输服务，可以进行降级处理采用图片，文本传输服务，最终还是能把信息传送给对方。因此，为了将语义相似应用的业务流程进行统一管理采用文献[12]提出的语义相似度计算方法，计算应用的相似度，具体计算方法为：

假设  $l, l_1, l_2 \in \Omega$  是文本标记信息， $W$  是所有单词的集合， $w : \Omega \rightarrow \mathcal{P}(W)$  是将文本标记信息拆分为一组单词的函数， $s : W \rightarrow \mathcal{P}(W)$  定义单词集合  $W$  的同义词集合(基于词典查询)。更进一步， $w_1 = w(l_1)$ ， $w_2 = w(l_2)$ ，并且  $w_i$  和  $w_s$  分别表示相同单词和同义单词的权重， $\text{sem}(l_1, l_2)$  表示文本标记  $l_1$  和  $l_2$  的语义相似度，具体的计算方法如式(1)所示：

$$\begin{aligned} \text{sem}(l_1, l_2) &= \frac{2 \times w_i \times |w_1 \cap w_2| + w_s \times (|s(w_1, w_2)| + |s(w_2, w_1)|)}{|w_1| + |w_2|} \end{aligned} \tag{1}$$

其中， $s(w_1, w_2)$  表示  $w_1$  的同义词出现在  $w_2$  中的集合。那么假设  $\text{rbp1}$  和  $\text{rbp2}$  表示两个 RBPs， $l_1$  和  $l_2$  是 RBPs 的文本标记信息，那么  $\text{rbp1}$  和  $\text{rbp2}$  的语义相似度为： $\text{Simsem}(\text{rbp1}, \text{rbp2}) = \text{sem}(l_1, l_2)$ 。

例如，假设我们指定  $w_i = 1.0$ ， $w_s = 1.0$ ，业务流程  $\text{rbp1}$  的文本标记为“通过 3G 传输视频信息”， $\text{rbp2}$  的文本标记为“传输图片信息”。这些文本标记分别由单词集合  $w_1 = [“传输”，“视频”，“信息”，“3G”]$  和  $w_2 = [“传输”，“图片”，“信息”]$  表示。我们需要考虑  $w_1 \setminus w_2 = [“视频”，“3G”]$  和  $w_2 \setminus w_1 = [“图片”]$  之间的同义词映射关系。假设“视频”和“图片”是同义词，而“3G”和“图片”是完全不同含义的。因此， $w_1$  和  $w_2$  的语义相似度为  $\text{sem}(w_1, w_2) = (1.0 \times 2 + 0.75 \times (1 + 0)) / 4 \approx 0.69$ 。

#### 3.2 数据相容性

针对运行时的业务流程变化，现有研究已提出很多算法和模型提供适变机制。为了表达活动之间的依赖关系，文献[13]提出了控制流检测表(CFC table)，用于存储业务流程实例的所有可能变化。当执行发生变化时，生成新的 CFC table。文献[14]通过分析新的 CFC table 中被修改的行，来增加\修改\删除规则以及变迁之间的结构一致性。通过这种方式可能会经常更新 CFC table，检查不一致性，造成不必要的开销。为此，本文的方法中定义内容类型的相容性，通过操作类型检测表(Operation Type Checking table, OTC table)记录内容之间的相容性。内容之间的相容性变化不大，更新频率更低。此外，由于相似业务流程中所涉及的传输内容的类型远小于所有相似业务流程中的变迁数量，因此 OTC table 的生成代价也比 CFC table 小。生成代价和更新频率使得 OTC table 更适合在运行时快速地为业务流程提供适变机制。

**定义 2** 一个业务流程  $p_1$  中的状态  $s_1$ ，与相似业务流程  $p_2$  中的状态  $s_2$  是相容的，当且仅当存在动作  $\text{act}$  使得状态  $s_1$  处的数据类型可以转换为状态  $s_2$  处的数据类型，即  $\text{OTC}((s_1, p_1), (s_2, p_2)) = \text{act}$ 。

例如，在视频传输服务中，经过压缩编码的 mpeg 视频信息可以通过转码操作将其转换为 jpeg 图片信息，那么我们就说这两种类型的信息具有相容性，是可以进行转换的。

当业务流程执行到某状态，变迁操作适变时，

将根据当前状态的类型查询 OTC 表，找到相似业务流程中与该状态内容类型相容的状态，通过相应的动作转换到相似业务流程中继续执行，从而为用户提供服务。

### 3.3 可可变业务流程

为了统一对运行时所有可能存在的业务流程实例进行统一的分析和验证，我们定义了可可变业务流程模型，该模型包含了根据相容性计算得到的所有可能发生适变的业务流程实例。

由于业务流程都具有单一初始节点，因此为了定义可变业务流程，我们引入一个初始结点  $s_0$ ，该节点与所有相似业务流程的初始结点相连，从而引入了初始变迁  $Tr_0$ ，是  $s_0$  到所有  $s_{i0}(i \leq n)$  的变迁集合，即  $Tr_0 = \{s_0 \times act_{i0} \times s_{i0} \mid \text{表示动作 } act_{i0} \text{ 触发流程 } rbp_i, i \leq k\}$ ，此外，除了相似业务流程内部的变迁之外，可变业务流程中还包含相似业务流程之间的转换动作，即

$$Act_u \subseteq \{O? \mid (s_{it}, O!, s_{jt}) \in RBP_t, \text{ where } s_{jt} \in OTC(S), 1 \leq t \leq n, 1 \leq i, j \leq S_t \mid \cup \{O! \mid (s_{it}, O?, s_{jt}) \in RBP_t, \text{ where } s_{it} \in OTC(S), 1 \leq t \leq n, 1 \leq i, j \leq S_t \mid \}$$

由此，给出包含所有业务流程实例的可靠的可变业务流程模型，定义如下：

**定义 3** 可变业务流程是一个 8 元组  $aRBP = (S, s_0, Act, Tr, L, succ, l, Steps)$ ，是  $n$  个具有相似语义的业务流程  $RBP_i = (S_i, s_{i0}, Act_i, Tr_i, L_i, succ_i, l_i)$ ， $i \leq n$  的合成，其中， $S = s_0 \cup \left( \bigcup_{i \leq n} S_i \right)$  是有限状态集合， $s_0 \in S$  是初始状态， $Act = \bigcup_{i \leq n} \{Act_i, act_{i0}\} \cup Act_u$  是动作集合， $Tr = Tr_0 \cup \left( \bigcup_{i \leq n} Tr_i \right) \cup Tr_u$  是变迁集合，其中转移变迁  $Tr_u = \{s_i \times \{act_u\} \times s_j \mid s_i \in S_i, s_j \in S_j, i \neq j, act_u \in Act_u\}$ ， $L = \left( \bigcup_{i \leq n} L_i \right)$  是标记集合， $succ = \left( \bigcup_{i \leq n} succ_i \right)$  是变迁转移成功函数集合， $l \in \Omega$  是业务流程的文本标记信息， $Steps : S \rightarrow 2^{Act \times succ(S)}$  是变迁的概率函数。

根据定义得到的信息传输服务的可变业务流程模型如图 2 所示，这是将视频、图片和短消息 3 种传输信息的业务流程进行合并得到的结果，当视频传输服务在某个状态执行失败时，将根据内容相容性，调用 OTC 表中的动作转入到图片传输的流程

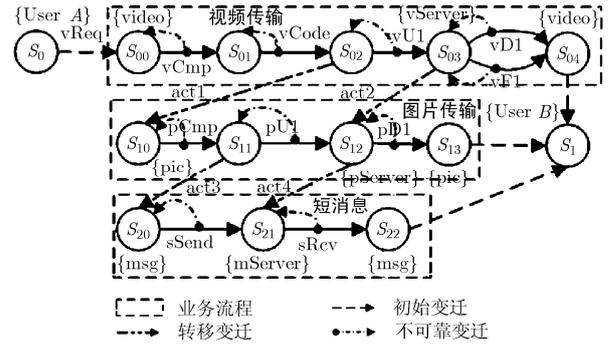


图 2 视频传输服务的可变业务流程模型

中，继续为用户提供服务，以此类推，图片传输失败时，可以转而通过短消息的方式将信息传递给用户。

业务流程的每一次可变都是一个决策的过程，根据不同的决策函数会产生不同的可变业务流程实例。

**定义 4** 函数  $f$  是自适应业务流程状态集合  $S$  上的决策函数，当且仅当对于  $\forall i \in S$  有  $f(i) \in Act(i)$ ，即  $f : S \rightarrow Act(i)$ 。全体决策函数组成的集合记作  $F$ ，其中  $Act(i)$  表示在状态  $i$  下所有可执行动作组成的集合。

决策函数序列  $\pi = (f_0, f_1, f_2, \dots)$  称为可变业务流程决策，其中  $f_i \in F, t \in T$ 。

### 4 仿真实验分析

以上，我们将基于 Web 服务的应用系统的可变业务流程建模为马尔科夫决策过程。接下来将采用概率模型检测技术对可变业务流程及相关属性进行分析。

由于可变业务流程是对一类具有相似功能的业务的统一建模，导致模型往往要比单一功能的业务流程更加复杂，我们将采用模型检测技术<sup>[15]</sup>对模型的各种性质进行有效的分析验证，将需要验证的属性用随机计算树逻辑(PCTL)进行描述。PCTL 是时序逻辑 CTL 的随机扩展，适合描述马尔科夫决策过程的属性，具体的语法结构定义见文献[15]。综合比较多种模型检测工具，本文采用概率模型检测工具 PRISM<sup>[16]</sup>对可靠的自适应业务流程模型进行分析和验证。

在本节中，以视频信息传输应用为例，利用 PRISM 工具对前两节中定义的模型和属性进行分析验证。为了验证模型的可靠性和资源消耗的相关属性。验证工具采用 PRISM 4.0.3 版本，实验环境为 Intel Pentium(R) CPU 6300, 2 GB 内存，Windows7 操作系统。所有的验证都在 1 s 之内完成。

#### 4.1 适变业务流程的分析验证

首先对适变业务流程的功能性和非功能性属性进行验证分析,根据文献[7]提供的相关参数设置及视频,图片和短信传输服务的实际运行情况,本实验中,将适变传输服务中视频,图片和短信传输服务中各操作执行成功概率分别设置为50%,90%和96%。

(1)安全性 表示适变服务在执行的过程中不会到达不期望的状态。例如服务不会出现死锁,表示为 $P \leq 0[F \text{ "deadlock"}]$ 。

(2)可靠性 表示适变服务在不可靠网络中,即使存在操作失败的情况也能在一定程度上保证服务的执行。例如服务执行过程中,能够将信息准确传递的概率 $\geq 0.95$ ,表示为 $P \geq 0.95[F \text{ "User B"}]$ 。

通过PRISM验证器对以上两种性质进行验证,得到性质满足的结果。说明适变业务流程能够正常运行。

(3)可达概率计算 对视频传输应用在每个时刻能够提供服务的概率进行分析。由于自适应业务流程存在执行过程中的不确定性导致服务执行存在不同的概率,针对所有的决策,PRISM可以得到可达性概率的最大和最小值。图3展示了在给定时间区间内提供服务的概率,在此,我们假设时间是离散值,每个动作的执行消耗1s。从图3看出,在最优决策情况下15s之后,最差决策下20s之后,视频传输应用提供的服务趋于稳定,基本能够为所有的请求提供服务。同时,根据计算可以得出,最大概率提供服务的路径是vCmp, vCode, act<sub>1</sub>, pCmp, act<sub>3</sub>, sSends, Rcv, 即一旦出现错误直接进行适变,该执行路径为模型的最优决策。另外,针对业务流程中,变迁成功转移概率(即,变迁可靠性)的不同,通过分析和实验,由图4可以看出,在最优决策支持下,15s之后适变业务流程基本上都能够为用户提供服务,并不依赖于视频应用中变迁的可靠性高低。

#### 4.2 适变业务流程与非适变业务流程的对比

其次,我们对适变业务流程和非适变业务流程

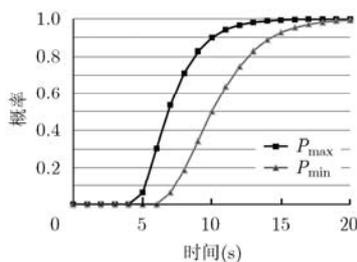


图3 适变传输服务在给定时间段提供服务的最大最小概率

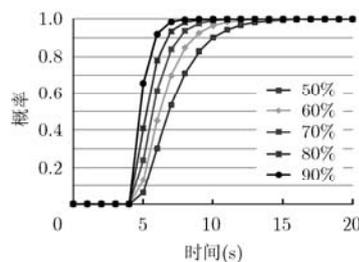


图4 不同可靠性变迁下提供服务的概率

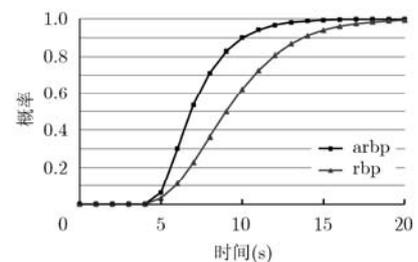


图5 arbp与rbp在一段时间内提供服务的概率

对提供服务的可靠性方面进行对比。在给定概率情况下,当视频,图片和文本传输流程中每个动作的可靠性分别为50%,90%和96%时,根据图5所示可以得出适变业务流程在相同时间内为用户成功提供服务的概率比非适变业务流程大,图中arbp表示适变业务流程,rbp表示非适变业务流程。再次,在视频业务流程中各动作可靠性不同的情况下,在给定时间(7s)内,适变业务流程能够比非适变业务流程提供更高概率的服务,在较短的时间内更有效地保障服务的提供。图6也充分说明了适变业务流程在不可靠情况下提供服务的概率远高于非适变业务流程,并且变迁可靠概率越低的情况下,适变业务流程能够提供服务的概率越高。

文献[7]讨论了融合网络下认知通信服务的适变描述模型。该模型能够分析业务中服务节点或通信内容的变化行为,并判断相关节点能力的变化情况,实施具体的功能节点选择策略,保证会话业务提供的连续性。方法可以根据模型提出的功能需求描述选择出功能最吻合的候选服务,但是该文并未对适变后的业务流程的合理性进行分析,无法从理论上说明适变后的业务流程是否能够维持信息的正常交互和传输。文献[8]针对的是物联网环境下的服务不可靠性进行建模和分析,指出动态环境下,设备之间的连接是不可靠的,从而导致服务提供的不可靠,这与本文的移动网络中服务提供不可靠的场景相似。但该文仅对这种不可靠服务进行了建模和分析,并未考虑出现不可靠服务和资源约束不满足的情况下如何进行适变以保证服务的连续性执行。

#### 5 结束语

随着移动互联网的飞速发展,应用服务的新特性和新需求给移动互联网的技术研究带来了许多机遇和挑战。本文针对移动互联网的动态性和服务的随机性,指出移动互联网环境下的应用服务需满足可靠性,具有适变能力,在此基础上,提出了一种对基于Web服务的应用系统的业务流程进行建模和分析的方法。首先,将带有可靠性约束的业务流程

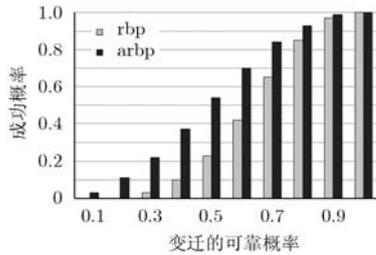


图 6 arbp 与 rbp 在不同变迁成功率下提供服务的概率

转换为马尔科夫链；然后通过服务的语义相似度计算及业务流程中状态的类型相容性，使得在执行过程中可以根据具体情况在相似业务流程之间切换；再次，为了有效地对所有可变业务流程实例进行有效的分析，将可变业务流程建模为马尔科夫决策过程；最后，采用随机模型检测技术对可变业务流程进行分析验证，通过实例进一步说明了方法的可行性和有效性。

在下一步的工作中，我们将进一步增强模型的描述能力，考虑服务执行相关的时间信息及应用执行过程中的资源消耗。另一方面，虽然 PRISM 具有很强的随机性分析能力，但是对于时间，安全相关的信息却不能进行分析，我们将在扩展模型的基础上，对 PRISM 工具进行扩展，使其能更好地对移动互联网环境下的服务模型进行分析和验证。

### 参 考 文 献

- [1] 范小芹, 蒋昌俊, 王俊丽, 等. 随机 QoS 感知的可靠 Web 服务组合[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 546-556.  
Fan Xiao-qin, Jiang Chang-jun, Wang Jun-li, *et al.*. Random-QoS-aware reliable Web service composition[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(3): 546-556.
- [2] 杨放春, 苏森, 李祯. 混合 QoS 模型感知的语义 Web 服务组合策略[J]. 中国科学(E 辑: 信息科学), 2008, 38(10): 1697-1716.  
Yang Fang-chun, Su Sen, and Li Zhen. Hybrid QoS-aware semantic Web service composition strategies[J]. *Science in China Series E: Information Sciences*, 2008, 38(10): 1697-1716.
- [3] Wang Shang-guang, Sun Qi-bo, and Yang Fang-chun. Towards Web service selection based on QoS estimation [J]. *International Journal of Web and Grid Services*, 2010, 6(4): 424-443.
- [4] Hwang San-yih, Lim Kaohsiung Ee-peng, and Lee Chien-hsiang, *et al.* Dynamic Web service selection for reliable Web service composition[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2008, 1(2): 104-116.
- [5] 郭慧鹏, 怀进鹏, 邓婷, 等. 一种可信的自适应服务组合机制[J]. 计算机学报, 2008, 31(8): 1434-1444.  
Guo Hui-peng, Huai Jin-peng, Deng Ting, *et al.* A dependable and adaptive approach to supporting Web service composition[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(8): 1434-1444.
- [6] Koning Michiel, Sun Chang-ai, Sinnema M, *et al.* VxBPEL: supporting variability for Web services in BPEL[J]. *Information and Software Technology*, 2009, 51(2): 258-269.
- [7] Jin Hua, Zou Hua, Yang Fang-chun, *et al.* Study on a session description model for cognitive communication services adaptation in converged network[C]. Proceedings of the 13th International Conference on Communication Technology, Ji'nan, China, 2011: 504-509.
- [8] Li Li-xing, Jin Zhi, Li Ge, *et al.* Modeling and analyzing the reliability and cost of service composition in the IoT: a probabilistic approach[C]. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Web Services (ICWS'12), Washington, DC, USA, 2012: 584-591.
- [9] Gao Hong-hao, Miao Huai-kou, Chen Sheng-bo, *et al.* Probabilistic timed model checking for atomic Web service [C]. Proceedings of the 7th IEEE World Congress on Services, Washington, DC, USA, 2011: 459-466.
- [10] Oghabi G, Bentahar J, and Benharref A. On the verification of behavioral and probabilistic Web services using transformation[C]. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Web Services, Washington, DC, USA, 2011: 548-555.
- [11] Kapuruge M, Han Jun, and Colman A. Controlled flexibility in business processes defined for service compositions[C]. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Services Computing, Washington, DC, USA, 2011: 346-353.
- [12] Dijkman R, Dumas M, Dongen B, *et al.* Similarity of business process models: metrics and evaluation[J]. *Information Systems*, 2011, 36(2): 498-516.
- [13] Zhang Shao-min and Wang Bao-yi. The research on decision approach of data dependence in dynamic workflow system [C]. Proceedings of the Sixth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies(PDCAT'05), Washington, DC, USA, 2005: 1027-1029.
- [14] Mejia Bernal J F, Falcarin P, Morisio M, *et al.* Dynamic context-aware business process: a rule-based approach supported by pattern identification[C]. Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC'10), New York, NY, USA, 2010: 470-474.
- [15] Baier C and Katoen Joost-pieter. Principles of Model Checking[M]. First Edition, Cambridge, Massachusetts London, England, The MIT Press, 2008: 745-899.
- [16] Kwiatkowska M, Norman G, and Parker D. PRISM 4.0: verification of probabilistic real-time systems[C]. Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Aided Verification (CAV'11), Utah, USA, 2011: 585-591.

张红霞：女，1981年生，博士生，讲师，研究领域为服务计算及形式化方法。

邹华：女，1969年生，博士，教授，主要研究领域为软件体系结构、服务计算、网络智能。

杨放春：男，1957年生，博士，教授，博士生导师，主要研究领域为下一代网络、业务生成环境及业务工程理论、网络安全。