

# 基于消息顺序图和 Petri 网的移动应用监测平台建模分析

纪建伟<sup>1</sup> 陈 昕<sup>1</sup> 黄浩军<sup>2,3</sup>

(北京信息科技大学计算机学院 北京 100101)<sup>1</sup> (武汉大学电子信息学院 武汉 430072)<sup>2</sup>

(清华大学信息技术研究院 北京 100084)<sup>3</sup>

**摘 要** 随着移动互联网的迅猛发展,移动应用的数量呈现井喷式的爆发,对其性能、故障和短板进行实时、有效的监测与分析是保证系统正常运行的关键。统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)作为一种功能较强的面向对象的图形建模工具,可以对移动应用监测平台进行建模分析,但在其过程描述中缺乏严格的语义。Petri 网作为一种离散事件动态系统的建模和分析方法,提供了在逻辑时序下研究系统特性和性能的有效手段,并具有图形方法的直观性和逻辑方法的概括性。通过将基于 UML 消息顺序图和 Petri 网的建模方法应用到移动应用监测平台的分析过程中,针对用户下发的监测任务构建系统的消息顺序图和 Petri 网模型,利用消息顺序图对平台各对象之间在时间顺序上的交互关系进行了验证,并利用 Petri 网化简规则和状态方程对该模型进行了结构上的正确性验证和可达性分析。

**关键词** 移动应用,监测平台,消息顺序图, Petri 网

**中图法分类号** TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.013

## Analysis of Mobile Application Monitoring Platform Based on Message Sequence Diagram and Petri Net

JI Jian-wei<sup>1</sup> CHEN Xin<sup>1</sup> HUANG Hao-jun<sup>2,3</sup>

(School of Computer, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)<sup>1</sup>

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)<sup>2</sup>

(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)<sup>3</sup>

**Abstract** With the rapid development of mobile Internet, the number of mobile applications presents the explosive eruption, and the real-time and effective monitoring and analysis for the performance, failure and short board of mobile applications is the key to ensure the normal operation of system. Unified Modeling Language(UML), as a powerful object-oriented graphics modeling tool, can be applied for modeling analysis of mobile monitoring platform. However, its process description lacks the strict semantics. As a discrete event dynamic system modeling and analysis method, Petri network has the direct and logical method of graphics method, and it provides an effective method to study the characteristics and performance of the system under the logic time. The modeling method based on UML message sequence diagram and Petri net is applied to the analysis of the process of mobile application monitoring platform. A message sequence diagram and Petri net model for the monitoring task of the user are constructed. The interactive relationship between the object of the platform and the time sequence is verified by using the message sequence diagram. The correctness and reachability of the model are analyzed by means of Petri net simplification rule and state equation.

**Keywords** Mobile application, Monitoring platform, Message sequence diagram, Petri net

## 1 引言

截至 2015 年 1 月,全球接入互联网的移动设备总数超过 70 亿台,并且在 2014 年末,谷歌应用商店 Google Play 和苹果 App Store 中应用(Application, App)数量分别突破 143 万和 121 万<sup>[1]</sup>。移动应用数量的井喷给应用开发者和运维人员带来了很大的挑战,为了保证应用程序的正常运行和快速故障处理,需要实时监测移动应用的运行情况。针对移动应用的监测平台可以对移动应用的性能、故障和短板进行实时、有

效的监测与分析,自动化的监测服务可降低运维人员的工作量,开发人员也可根据监测数据分析的结果修复或改善应用程序代码,进而提高应用程序的用户体验。

工业界比较成熟的移动应用监测平台有两类:1)通过在移动应用中嵌入平台 SDK 代码的方式对应用的性能和用户的行为进行监测,如 New Relic<sup>[2]</sup>;2)通过部署节点针对移动应用抓包统计分析应用的性能。两类平台的各模块的交互都涉及到 workflow 的管理<sup>[3]</sup>,现阶段对于移动应用监测平台的建模方法的研究主要是围绕 workflow 建模而展开的。Keller<sup>[4]</sup>提

到稿日期:2015-08-11 返修日期:2016-03-03 本文受国家 973 项目(2011CB302601),国家自然科学基金(61370065,61502040,61402343,61170290,61222213),国家科技支撑计划(2015BAK12B03-03)资助。

纪建伟(1990-),男,硕士生,主要研究方向为移动云平台, E-mail: beijingjiw@163.com;陈 昕(1965-),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络及性能评价、网络安全、航电网络;黄浩军(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线网络、计算机网络与大数据。

出基于事件驱动的过程链模型,用以描述任意复杂度的“事件-功能流”,并将信息对象及组织单元依附于功能中,从而描述了信息流在不同模块之间的流转。目前大多数 workflow 管理系统提供的都是基于活动网络的模型,它是以活动和活动之间的关系为基础建立的工作流模型。基于 UML 的工作流建模利用不同的图来表示工作流的静态表述和动态执行,包括顺序图、状态图、活动图等<sup>[5]</sup>。Petri 网也被用于建立工作流模型,并针对其需求发展了很多变体。Papazoglou 等人<sup>[6]</sup>则采用有色 Petri 网来描述一个工作流过程,Vander Aalst<sup>[7]</sup>则以 Petri 网为基础定义了工作流网 workflow nets。

为了更好地改进移动应用监测平台的设计,本文针对用户下发的监测任务构建系统的消息顺序图,利用 UML 中的消息顺序图对平台各对象之间在时间顺序上的交互关系进行了验证;并利用 Petri 网进行建模,借助 Petri 网化简规则对该模型进行了结构上的正确性验证。

并发系统中的一些缺陷经常被忽略,比如时间冲突<sup>[8]</sup>。UML 中的消息顺序图用于描述并发系统的设计需求,提供信息系统中的执行场景,描述对象之间的动态交互关系,着重体现对象之间消息传递的时间顺序<sup>[9]</sup>。

Petri 网是完全从过程的角度出发,通过对复杂系统的描述与分析来进行设计的一种有效模型工具,它在描述并发、冲突、同步等重要行为现象所表现出的优势以及具有形式化步骤与数学图论相支持的理论严密性,特别是其图形表达直观和便于编程实现的技术特点尤其适合并发任务系统的设计。利用 Petri 网所建立的模型不但可以达到宏观控制的效果,而且可以从微观上反馈这些任务流程的每一细节。此外,它能刻画系统中的变化、变化发生的条件和发生结果的影响、变化间的关系等。所以把 Petri 网理论用在移动监测平台工作流的描述中,通过建模分析研究可知,这对提升移动应用监测平台的整体运作效率具有很大的作用。

本文第 2 节介绍移动应用监测平台的整体架构;第 3 节利用消息顺序图对平台进行建模;第 4 节建立移动应用监测平台的 Petri 网模型,然后通过 Petri 网化简规则对模型的结构进行分析,并利用状态方程对模型进行了可达性分析;最后总结全文,并对下一步的工作进行展望。

## 2 移动应用监测平台

移动应用监测平台提供了下一代移动应用性能监测管理解决方案,可帮助开发者解决应用上线后性能问题的监控与管理。该平台通过部署在全国各地的边缘探测节点以黑盒<sup>[10]</sup>方式收集移动应用数据,通过数据处理与分析及时发现移动应用使用过程中的崩溃、连接超时等问题,通过实时、多维立体的性能数据展现与自动分析,帮助开发者降低应用上线后的维护开发成本。

整个移动应用测量服务平台由 Portal、数据平台、流程控制服务器、任务配置服务器、边缘探测节点 5 部分组成。

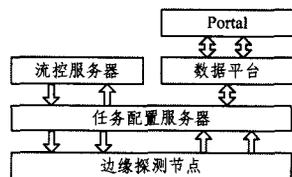


图 1 移动 APP 测量服务平台整体架构

移动应用测量服务平台的整体架构如图 1 所示,详细介绍如下:

### (1) Portal

Portal 根据用户的需求从数据平台提供的 Web Service 接口读取数据,生成相应图表以供用户查询。

### (2) 数据平台

数据平台的主要功能是对监测数据进行存储和处理,包括 MySQL 数据库和 Hadoop 数据平台<sup>[11]</sup>,Hadoop 数据平台包含 HBase 数据库<sup>[12]</sup>以及 HDFS 存储系统,可以向 Portal 提供 Web Service 接口。

### (3) 流控服务器

流控服务器的主要功能是对整个测量平台的工作进行控制管理。主要功能为:1)向任务配置服务器下发测量任务或测量工具安装升级删除任务;2)定期接收边缘测量节点上传的数据,并传给数据中心;3)定期触发数据中心对数据的各种处理。

### (4) 任务配置服务器

任务配置服务器的主要功能:1)把流控服务器测量任务和测量工具的安装升级删除任务,通过配置服务器下发到指定的边缘探测节点进行执行;2)对边缘测量节点上传的数据进行整理,并向流控服务器发送数据,收集完成的触发指令。

### (5) 边缘探测节点

边缘探测节点的主要功能是根据配置服务器下发的任务信息,或者调用相关的测量工具,对测量目标进行测量,采集测量数据,按规定上传到数据平台;或者安装升级删除测量工具。

## 3 移动应用监测平台的消息顺序图模型

消息顺序图是以一种简洁、严格、直观可视的图形化语言来描述系统中各部件交互机制的工具,在很多领域得到了广泛的应用。利用消息顺序图可以很好地描述系统各模块之间的交互。

定义 1 一个消息顺序图是一个五元组

$$\Sigma = (E, M; send, receive, type)$$

其中, $E$ 为有限实体集; $M$ 为有限消息集; $send: M \rightarrow E$ 为发送标记函数,每一条消息有一个发送者; $receive: M \rightarrow E$ 为接收标记函数,每一条消息有一个接收者; $type: M \rightarrow \{s, a\}$ 为消息类型函数,把每一条消息映射为同步消息或异步消息, $s$ 表示同步, $a$ 表示异步<sup>[13]</sup>。

移动应用测量顺序图如图 2 所示。

由定义 1 可知, $E = \{用户, Portal, WS(Web Service)服务器, Hadoop 数据平台, 流控服务器, 任务配置服务器, 边缘测量节点, 测量对象, App 文件服务器\}$ ,  $M = \{任务配置信息, 任务配置反馈信息, App 文件请求信息, App 文件, App 监测工具信息, 移动应用监测数据, 反馈信息\}$ 。

具体任务流程如下:

(1)用户通过 Portal 系统建立针对移动应用的监测任务,选择需要测试的 App,配置相关任务参数,如任务名称、App 文件路径、监测周期、监测节点等;

(2)Portal 将任务信息存入 MySQL 数据库;

(3)Portal 提交监测任务到流控服务器,携带任务编号/任务类型等信息;

(4)流控服务器下发监测任务到任务配置服务器,标明任务的执行周期;

(5)任务配置服务器选择测量节点,将测量任务及测量工具的安装升级删除任务下发到边缘服务节点,驱动边缘探测节点完成相关的任务;

(6)向流控服务器反馈配置结果;

(7)向 Web Service 服务器反馈配置结果;

(8)向 Portal 反馈配置结果;

(9)Portal 向用户展示任务创建情况;

(10)边缘测量节点根据 App 文件路径向 App 文件服务器请求下载 App 文件;

(11)App 文件服务器将 App 文件下载至边缘测量节点;

(12)边缘测量节点将 App 文件传输至测量对象,并将其安装在测量对象的安卓虚拟机上,调用不同的测量工具对运行的 App 进行主动式的周期性测量;

(13)边缘测量节点获取移动应用监测信息;

(14)边缘测量节点将数据上传到流控服务器;

(15)流控服务器将上传的消息格式的数据汇总为文件并

上传到 Hadoop 数据平台,Hadoop 数据平台将数据存入 HDFS 文件系统中,并调用相关算法对数据进行处理,处理后的数据存入 HBase 数据库中;

(16)用户向 Portal 提交查询数据的请求;

(17)Portal 向 Web Service 服务器发送查询参数;

(18)Web Service 服务器发送查询参数到 Hadoop 数据平台;

(19)Web Service 服务器调用 Hadoop 数据平台接口返回测量信息;

(20)Portal 调用 Web Service 服务器接口返回数据;

(21)Portal 将数据以图表的形式展现给用户。

通过消息顺序图可以清晰地看到整个系统的运行过程及对象之间消息传递的时间顺序,(1)–(15)为用户下发任务到任务测量数据入库的时间顺序;(16)–(21)为用户查询任务的数据流向的时间顺序,但是顺序图还不能充分地验证系统的有效性。第 4 节将对(1)–(15)的任务流进行 Petri 网建模。

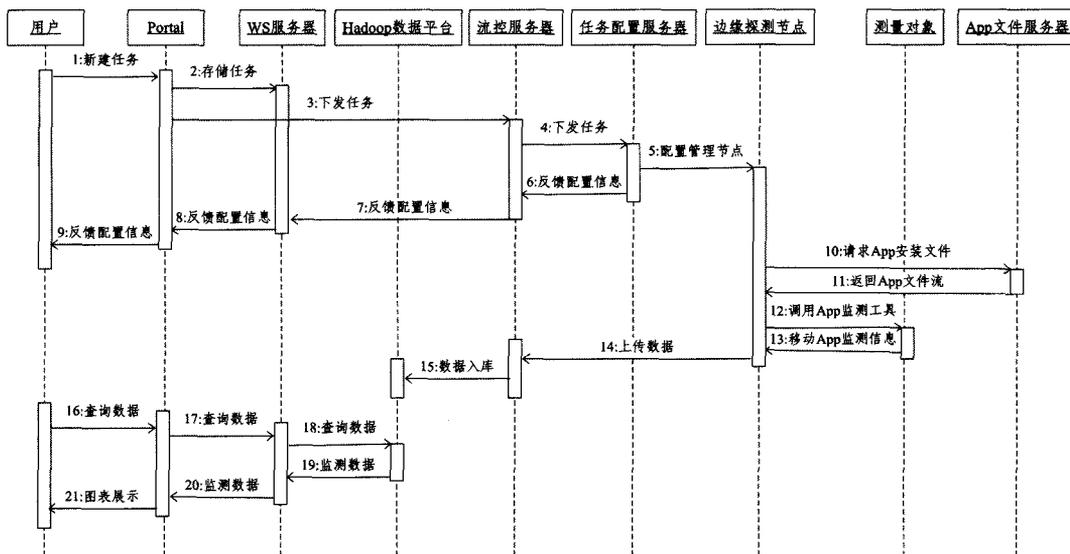


图 2 移动应用监测顺序图

更适合于描述同步并发系统,并为解决一些问题提供了新的途径。

系统的 Petri 观点可简单地归纳为两个基本概念:状态和事件,很多系统可以从状态和事件的角度去建模。事件是系统中的动作,事件的出现是由系统状态控制的;系统的状态也可以描述为一组条件,条件可成立或不成立。为了使事件发生,必须使条件成立,即系统达到满足事件发生的状态,这是事件的前置状态,事件发生后的状态为事件的后置状态。

本文用以上观点来研究移动应用监测平台的 Petri 网建模问题。该平台监测移动应用的流程在第 3 节的消息顺序图中有详细的描述。根据以上流程,提出移动应用监测平台的 Petri 网模型,如图 3 所示。

该系统的状态可以概括为:

P1:用户在登陆状态;

P2:监测任务信息输入完成;

P3:MySQL 完成任务信息存储;

P4:流控服务器获取任务配置信息;

## 4 移动应用监测平台的 Petri 网模型

### 4.1 Petri 网建模

定义 2 一般 Petri 网定义为六元组

$$\Sigma = (P, T; F, K, W, M_0)$$

其中, $P$  为库所的集合(每一位置代表一种资源),用圆圈代表,表示系统的状态; $T$  为变迁的集合,用空心矩形代表,表示系统中的事件; $F$  称为流关系,其规定资源的流动; $K$ 、 $W$  和  $M$  依次是容量函数、权函数和标识; $M_0$  为  $\Sigma$  的初始标识<sup>[14]</sup>。

利用 Petri 网建模具有以下优点:

(1)从控制和管理角度模拟系统,不涉及系统所依赖的相关技术,这样可以简化某些细节,易于理解;

(2)精确描述系统中事件的依赖关系和非依赖关系;

(3)具有统一的语言描述系统结构和行为,方便建模仿真,从而起到沟通不同子系统间桥梁的作用;

(4)与顺序模型不同,Petri 网系统比其他图形建模工具

- P5:任务配置服务器获取 App 测量配置信息;
- P6:边缘探测节点获取任务信息;
- P7:App 文件服务器获取文件请求信息;
- P8:边缘探测节点获取 App 安装文件;
- P9:测量对象内的虚拟机安装并运行 App;
- P10:边缘探测节点获取测量信息;
- P11:边缘探测节点进入循环周期测量状态;
- P12:流控服务器获取信息成功;
- P13:Hadoop 数据平台存储任务测量数据。

该系统的事件可以概括为:

- T1:用户创建监测任务;
- T2:存储监测任务到 MySQL,下发任务配置信息至流控服务器;
- T3:下发任务配置信息至任务配置服务器;
- T4:返回任务下发失败信息;
- T5:下发任务信息至边缘探测节点;
- T6:向 App 文件服务器请求 App 安装文件;
- T7:向边缘探测节点发送 App 安装文件;
- T8:边缘探测节点接收 App 安装文件失败;
- T9:配置测量工具并传输 App 安装文件至测量对象;
- T10:根据任务信息测量对象进行测量;
- T11:封装测量数据,上传数据至流控服务器;
- T12:触发时间周期;
- T13:数据存储至 Hadoop 数据平台。

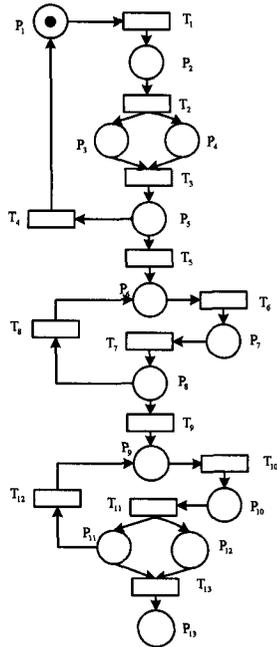


图3 移动应用监测平台的 Petri 网模型

#### 4.2 基于 Petri 网化简技术的模型验证

根据 workflow 管理联盟 (Workflow Management Coalition, WFMC) 提出的标准<sup>[15]</sup>, 复杂的工作流模型都可以用一组简单的结构复合而成, 这 4 个基本结构分别是: 顺序结构、并发结构、选择结构和循环结构, 它们之间可以等效地用 Petri 网对应表示。通过网的变换技术减小网的规模, 然后对其分析是一种实际可行的方法。Murata 定义了 6 条针对任何 Petri 网的化简规则<sup>[16]</sup>: 合并串联库所、合并串联变迁、合并平行库

所、合并平行变迁、消除自环路库所、消除自环路变迁。针对工作流的结构特性, 文献<sup>[17]</sup>提出了一种时间 Petri 网保持时间约束特性不变的等效变换规则, 该规则与文献<sup>[16]</sup>中部分简化规则等价, 其同样适用于一般 Petri 网。文献<sup>[17]</sup>中 4 种基本结构对应的子网的等效变换规则如图 4 所示。

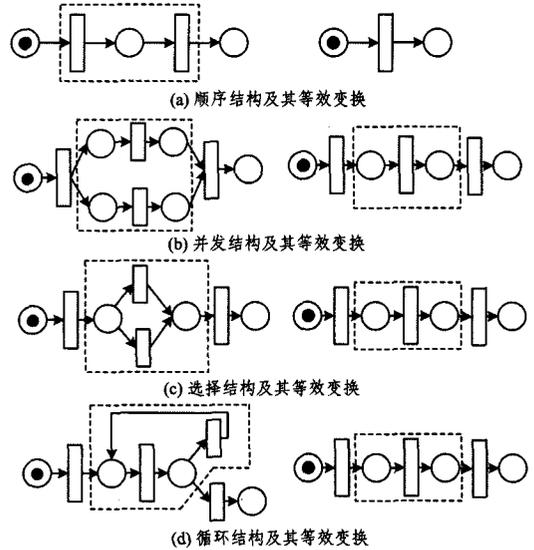


图4 工作流模型的 4 种基本结构及等效变换规则

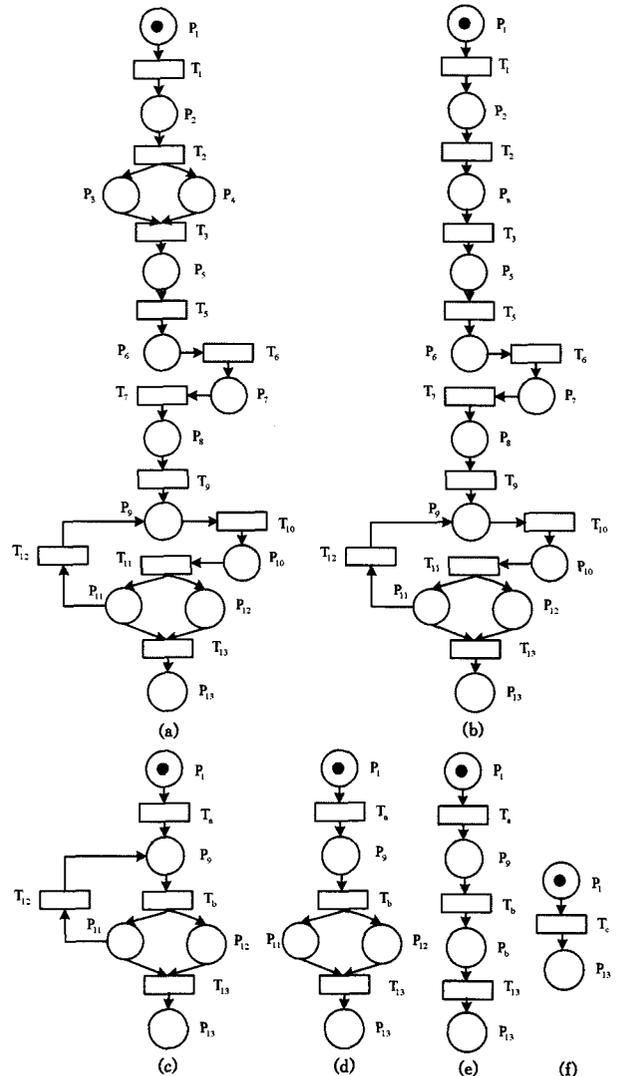


图5 移动应用监测平台的 Petri 网模型及化简过程

图5所示为模型的化简图,以下为具体的化简过程:

(1)将图4中的 $T_4, T_8$ 运用循环结构及其等效变换图化简,得到图5(a);

(2)将图5(a)中的 $P_3$ 运用并行结构及其等效变换图化简,得到图5(b);

(3)将图5(b)中的 $P_2, T_2, P_4, T_3, P_5, T_5, P_6, T_6, P_7, T_7, P_8, T_9$ 和 $T_{10}, P_{10}, T_{11}$ ,运用顺序结构及其等效变换图化简,得到图5(c);

(4)将图5(c)中的 $T_{12}$ 运用循环结构及其等效变换图化简,得到图5(d);

(5)将图5(d)中的 $P_{11}$ 运用并行结构及其等效变换图化简,得到图5(e);

(6)将图5(e)运用顺序结构及其等效变换图化简,得到图5(f),完成化简。

以上所述证明了图4中的Petri网模型在结构上的正确性,不存在活锁、死锁等结构上的设计错误。

### 4.3 基于状态方程的可达性分析

定义3(可达性) 当一个Petri网对于给定的初始标识 $M_0$ 和目标标识 $M_n$ 存在一个启动序列 $\delta$ ,可使得 $M_0$ 变迁为 $M_n$ ,则称 $M_n$ 是从 $M_0$ 可达的,用 $M_0 \rightarrow M_n$ 或 $M_0[\delta > M_n$ 表示,其中 $\delta=t_1, t_2, \dots, t_n^{[14]}$ 。

对于一般Petri网 $\Sigma=(P, T; F, K, W, M_0)$ ,利用关联矩阵和状态方程可以对所建立的模型进行可达性分析,该过程分两步:

(1)对给定的一个标识 $M$ ,判断是否存在 $n(n=|T|)$ 维非负整数向量 $X$ 满足状态方程 $M=CX+M_0$ ,这是标识 $M$ 从 $M_0$ 可达的一个必要条件而非充要条件。如果不存在非负整数解,则 $M_0$ 到 $M$ 是不可达的;如果存在非负整数解,则进行步骤(2)。

(2)对非负整数解 $X$ ,检查是否存在变迁序列 $\sigma \in T^*$ 使得 $M_0[\sigma > \forall i \in \{1, 2, \dots, |T|\}: \#(t_i/\sigma)=X(i)$ ,称 $\sigma$ 为对应于 $X$ 的一个合法序列,当存在合法序列时,就可以判定该系统可达。

为了建立关联矩阵,用 $C^-$ 和 $C^+$ 表示Petri网中的流关系, $C^-$ 表示与输入位置的连接关系, $C^+$ 表示与输出位置的连接关系,而Petri网的关联矩阵 $C=C^+ - C^-$ 。建立的Petri网模型的关联矩阵表示如下:

$$C^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^+ = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则

$$C = C^+ - C^-$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

初始状态的标识向量 $M_0$ 和最终状态的标识向量 $M_{13}$ 分别为:

$$M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$M_{13} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

根据标识向量之间的关系 $M_{13}=CX+M_0$ ,得:

$$X = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T$$

进一步考察,可以找出变迁序列:

$$\delta = (t_1, t_2, t_3, t_5, t_6, t_7, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{13}),$$

$$\#(t_i/\sigma) = X(i), i=1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13$$

使得 $M_0[\delta > M$ ,所以 $M_0$ 到 $M$ 是可达的。

因此,根据序列 $\delta$ 引发各个迁移,可以从初始状态 $M_0$ 达到最终状态 $M_{13}$ ,即用户下发监测任务后,平台可通过内部的工作流程最终获得监测数据供用户查询。

**结束语** 本文利用消息顺序图和Petri网对移动应用监测平台进行了建模分析。首先介绍了移动应用监测平台的框架;其次,利用消息顺序图对监测应用的工作流进行建模,并分析了对象之间消息传递的时间顺序;然后,利用Petri网对监测应用的工作流进行建模,通过Petri网化简规则对模型的结构进行了分析,证明了Petri网模型在结构上的正确性;并利用状态方程对所建立的模型进行了可达性分析。下一步工作将进一步研究针对模型的带时间因素的化简技术。

### 参考文献

[1] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traf-

- fic Forecast Update[R]. 2014-2019 White Paper, Mar 2015
- [2] Enck, William, et al. TaintDroid: an information-flow tracking system for realtime privacy monitoring on smartphones[J]. ACM Transactions on Computer Systems(TOCS), 2014, 32(2): 5-20
- [3] Ries, Christian L. Dafit—a new work flow oriented approach for time efficient data preparation, validation and flagging of time series data from environmental monitoring[C]// Proceedings of the 27th Conference on Environment Informatics—Informatics for Environ. 2013, 651-656
- [4] Thomas C, Gerhard K, Andrew L, et al. SAP R/3 business blueprint: understanding the business process reference model[M]. Prentice-Hall, Inc., 1997
- [5] Fang Jin, Wang Tie-cheng, Shi Zhi-kuan, et al. UML workflow model[J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(9): 1572-1575(in Chinese)  
方进, 王铁成, 石志宽, 等. 基于 UML 的工作流建模[J]. 计算机工程与设计, 2004, 25(9): 1572-1575
- [6] Mike P, Bouguettaya D A, Mostafa A H, et al. Class library support for workflow environments and applications [J]. IEEE Transactions on Computers, 1997, 46(6): 673-686
- [7] Aalst V, Wil M P. Structural characterizations of sound workflow nets[M]. Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computing Science, 1996
- [8] Alur R, Holzmann G J, Peled D. An analyzer for message sequence charts[C]// International Workshop on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Springer Berlin Heidelberg, 1996: 35-48
- [9] Yang Nian-hua, Yu Hui-qun, Sun Hua, et al. Modeling UML sequence diagrams using extended Petri nets[J]. Telecommunication Systems, 2012, 51(2/3): 147-158
- [10] Bo Jiang, Xiang Long, Gao Xiao-peng. Mobiletest: A tool supporting automatic black box test for software on smart mobile devices[C]// Proceedings of the Second International Workshop on Automation of Software Test. IEEE Computer Society, 2007: 8-15
- [11] Stratos I, Olga P, Surajit C. Overview of Data Exploration Techniques[C]// Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2015: 277-281
- [12] Krishna K V, Arun K K, Kaladhar V, et al. Implementation and evaluation of scalable data structure over HBase[C]// Proceedings of the International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. ACM, 2012: 1010-1018
- [13] Li Jing-feng, Li Yan, Chen Ping. Formal description of the UML sequence diagram[J]. Computer Science, 2002, 29(6): 147-148 (in Chinese)  
李景峰, 李琰, 陈平. UML 顺序图的形式化描述[J]. 计算机科学, 2002, 29(6): 147-148
- [14] Wu Zhe-hui. Petri nets introduction[M]. DynoMedia Inc., 2006 (in Chinese)  
吴哲辉. Petri 网导论[M]. DynoMedia Inc., 2006
- [15] Coalition, Manage W. Terminology glossary [M] // Medicina Sporta. 2006: 513-524
- [16] Murata, Tadao. Petri nets, Properties, analysis and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580
- [17] Yi Xiao-sheng, Jiang Hao. Time petri nets equivalent conversion workflow evaluation [J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(20): 3916-3919(in Chinese)  
衣晓升, 姜浩. 时间 Petri 网等效变换的工作流评价[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(20): 3916-3919

(上接第 65 页)

- [4] Sun Y, Zhang H. A software safety analysis method based on S-invariant of Petri Net[C]// 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety(ICRMS). IEEE, 2011: 487-492
- [5] Peng Z. The safety analysis of flight landing based on Time Petri Net[C]// 2012 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS). IEEE, 2012: 1-5
- [6] Luo Peng-cheng. A study on the modeling and analysis technique of system safety analysis based on petri nets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001(in Chinese)  
罗鹏程. 基于 Petri 网的系统安全性建模与分析技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2001
- [7] Cho S M, Hong H S, Cha S D. Safety analysis using coloured Petri nets [C] // Asia-Pacific Software Engineering Conference, 1996. IEEE, 1996: 176-183
- [8] Vicario E. Static analysis and dynamic steering of time-dependent systems[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2001, 27(8): 728-748
- [9] Berthomieu B, Diaz M. Modeling and verification of time dependent systems using time Petri nets[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1991, 17(3): 259-273
- [10] Vicario E, Sassoli L, Carnevali L. Using stochastic state classes in quantitative evaluation of dense-time reactive systems[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2009, 35(5): 703-719
- [11] Horváth A, Paolieri M, Ridi L, et al. Transient analysis of non-Markovian models using stochastic state classes [J]. Performance Evaluation, 2012, 69(7): 315-335
- [12] Aziz A, Sanwal K, Singhal V, et al. Model-checking continuous-time Markov chains[J]. ACM Transactions on Computational Logic(TOCL), 2000, 1(1): 162-170
- [13] Carnevali L, Ridi L, Vicario E. Sirio: A framework for simulation and symbolic state space analysis of non-Markovian models[C]// 2011 Eighth International Conference on Quantitative Evaluation of Systems(QEST). IEEE, 2011: 153-154
- [14] Tomek L, Mainkar V, Geist R M, et al. Reliability modeling of life-critical, real-time systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(1): 108-121