

支持异常处理的柔性工作流可信赖性分析

张静乐¹ 杨扬¹ 曾明¹ 王元卓²

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)¹ (清华大学计算机系 北京 100084)²

摘要 随着人们对柔性工作流认识的不断增强,柔性工作流管理系统的可信赖性变得越来越重要。异常作为影响工作流柔性的主要原因之一,对系统的可信赖性有很大的影响。提出了一种基于随机 Petri 网的支持异常处理的柔性工作流建模与性能分析方法,并以电子商务系统中的物流系统为例,在随机 Petri 网模型建模的基础上着重分析了柔性工作系统的可用性、可靠性等性能参数。

关键词 异常,柔性工作流,随机 Petri 网,电子商务

Reliability Analysis for Flexible Workflow Supporting Exception Handle

ZHANG Jing-le¹ YANG Yang¹ ZENG Ming¹ WANG Yuan-zhuo²

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)²

Abstract With growing awareness of the flexible workflow, reliability of flexible workflow system has become more and more important, as one of the main reasons of the impact of work flexible workflow, exception has a great impact on reliability of flexible workflow system. This paper presented a stochastic Petri net based flexible workflow modeling and performance analysis method supporting exception handling, and took e-commerce systems in the logistics system for example, the flexible system's availability, reliability and other performance parameters were analyzed based on the stochastic Petri net in modeling.

Keywords Exception, Flexible workflow, Stochastic Petri net, E-business

1 引言

系统能够提供可信赖服务的能力就是可信赖性,可信赖性是度量各种系统服务质量的重要指标,可信赖性问题极大地影响着系统的性能,它的任务是研究系统或设备在设计 and 使用的各阶段,定性与定量地分析、控制、评估和改善系统或设备的可信赖性,并在设计中达到可信赖性与经济性综合平衡^[1]。随着工作流管理研究的成熟与发展,工作流技术在制造业中也获得了越来越广泛的应用,使得企业能够实现业务过程集成、业务过程自动化与业务过程的管理。为了应对企业在发展过程中不断出现的许多新需求,目前的工作流技术正在经历从刚性向柔性的变革当中,柔性工作流最大的特点是可以应对企业流程中存在着的大量的执行逻辑无法事先确定的半结构化和非结构化的经营过程,例如各种任务变更和流程异常,在此前提下,柔性工作流系统能否正确、安全、高效地完成指定任务,即能否提供可信赖的服务能力,已成为人们关心的主要问题之一。本文在分析了柔性工作流特性的基础上,提出了支持异常处理的柔性工作流可信赖性分析方法,并在此基础上给出了 ELMS (E-Business Logistics Management System) 物流配送系统的建模与可靠、可用等性能分析。

随机 Petri 网作为一种比较理想的系统建模和性能分析

工具,已经在很多领域得到了广泛应用,因此,本文将重点研究利用随机 Petri 网进行模型的建模以及性能分析。

2 可信赖性

1952 年 Robert Lusser 在 San Diego 的一次论坛上首次提出了关于系统可信赖性的定义和参数。1953 年 Richard R Carhart 对它作了概括,指出系统可信赖性 (Dependability) 是在一定的条件下,系统在一定的时间区间内完成一定功能的能力^[2]。在文献^[3,4]中,可信赖性被进一步定义为,避免不可接受的频繁发生服务失效的能力。在这里我们将可信赖性定义为系统在受到外部攻击或者由于人为误操作、环境影响以及硬件故障和软件 bug 使得系统失效时,连续提供服务并在规定时间内恢复所有服务的综合能力。之所以称它为一种综合能力,是因为衡量这个能力的标准并不是,也不可能是单一的,而是一个由多方面综合因素确定的评价体系。具体而言,它所包括的主要指标有可靠性 (Reliability)、可用性 (Availability)、可运行性 (Performability)、可维护性 (Maintainability)、安全性 (Safety)、保密性 (Security)。其中:

可靠性指系统提供正确服务的连续性,可以用 $R(t)$ 度量,一般认为系统在 0 时刻正常工作的条件下,在 $(0, t]$ 时间区间内正常服务的概率。

到稿日期:2009-06-16 返修日期:2009-08-22 本文受国家自然科学基金(No. 60673160, No. 60873192, No. 60803123)资助。

张静乐 博士生,主要研究方向为网格、工作流、协同设计, E-mail: zhangle80@126.com; 杨扬 教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络和图像处理。

可维护性指系统调整、修复和容错的能力,一般可以认为是系统服务失效后在时间间隔 t 内被修复的概率。

可用性指系统可以提供正确服务的能力,它是为可修复系统提出的,是可靠性和可维护性的综合描述。

安全性定义为在一个周期时间内网络系统不对环境和用户造成灾难性后果的概率。

保密性指系统重要信息不被未经授权的用户获知的能力。

3 柔性 workflow 异常处理

文献[5]认为, workflow 业务过程本身及其执行都不是一成不变的,主要由内因和外因两个方面构成。外因是商业、法律和科技等环境变化,内因来自 workflow 过程本身的需求和执行中的意外情况,内外因素都可能造成过程执行与原过程定义的偏离^[6],通常称为 workflow 变更或异常。灵活、动态地处理变更和异常的能力体现为 workflow 系统的柔性。本文主要讨论柔性 workflow 的异常处理。

3.1 支持异常处理的柔性 workflow 系统

异常是造成工业流程自动化复杂性和局限性的主要原因。根据其对工作流系统影响的范围、影响的程度,以及是否可以预见等,可以将异常分为以下几种类型。

影响的范围:个人级、群组级和组织^[7]。

影响的程度:噪音(noise)、特殊异常(idiosyncratic exceptions)、演进异常(evolutionary exceptions)^[7]。

是否可预见:可预料(expected)和不可预料异常(unexpected)^[8]。文献[9]按照引起异常的事件,将可预料异常分为 workflow 异常、数据异常、时序异常和外部异常。

除去以上几类类型外,还有按照其他方法进行的分类,如按照异常影响到的系统抽象层次^[10]等等。

3.2 处理方法

对于异常来说,文献[8]认为处理异常分为3个阶段:发现(Detection)、诊断(Diagnosis)、解析(Resolution)。其中发现(Detection)负责寻找造成异常的事件的触发条件,诊断(Diagnosis)过程根据这些触发条件决定某个异常的具体解决方案(Exception Handler),最后一步解析(Resolution)设计适当的流程来执行这些解决方案(Exception Handler)。

4 支持异常处理柔性 workflow 建模

在可信性研究的发展过程中,为了得到各种可信性指标,人们提出了各种各样的可信性分析技术和建模工具,利用这些工具建立反映系统行为和性质的数学模型,在此基础上进行性能和可信性分析。其中,随机 Petri 网对系统的并发性、异步性和不确定性具有很强的动态分析能力,同时具有建模原语少、符合直观的图形表示等优点,它既能描述系统状态,又能表现系统行为,且全局的状态和行为不是最基本的概念,而是由局部的状态和行为组合得到的,特别适合于对系统建模和进行可信性分析。

Stochastic Petri Net (SPN)作为分析离散事件动态系统的有力工具被广泛应用于计算机网络^[11]、资源共享系统^[12]以及并行和并发计算^[13]等研究领域。具体细节请参考相关文献,随机 Petri 网可以描述成一个四元组 $SPN = (P, T, F, \lambda)$,其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$,是有穷位置集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$,是有穷变迁集合; $(P \cap T \neq \Phi), (P \cup T \neq \Phi); F \subseteq (P \times$

$T) \cup (T \times P)$,是弧的集合; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$,是变迁平均实施输率集合。

4.1 柔性 workflow 异常处理模型

对于支持异常处理的柔性 workflow 系统,其基本的处理流程包括异常编辑(Edit)、异常诊断(Diagnosis)、异常解决(Resolution),模型结构如图1所示。

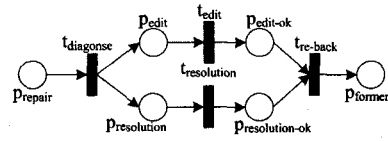


图1 异常处理模型

图1中, t_{edit} 指对异常进行编辑和保存的操作,该操作是将系统出现的异常保存下来,便于分析,同时遇到同样异常的时候可以近似处理, $t_{diagnose}$ 指对异常进行诊断操作,分析异常产生的原因及其处理方法, $t_{resolution}$ 指对异常进行相应处理的操作, $t_{re-back}$ 是指流程转回异常处理之前的操作。

对图1异常处理模型进行模型简化之后可以得出图2所示的简化模型。

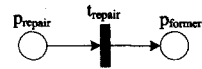


图2 简化异常处理模型

由文献[14]可对上图进行并行结构模型简化,利用 t_{repair} 替换原来模型的并行部分之后可以得到图2所示的简化异常处理模型。

4.1.1 单结构异常处理模型

简单结构异常处理模型,指当异常出现在串行结构中且异常部件只有一个时的异常处理模型,如图3所示。

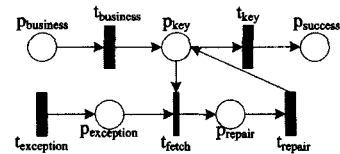


图3 简单结构异常处理模型

图3中, p_{key} 代表为可能会出现异常的部件,当系统出现异常也即 $t_{exception}$ 以一定概率触发的时候, p_{key} 将转入异常处理 p_{repair} 。

4.1.2 串联结构异常处理模型

串联结构异常处理模型,指当异常出现在两个或两个以上异常部件中且只有当这些出现异常的部件全部通过唯一的修复部件修复成功之后系统才能恢复正常的异常处理模型,如图4所示。

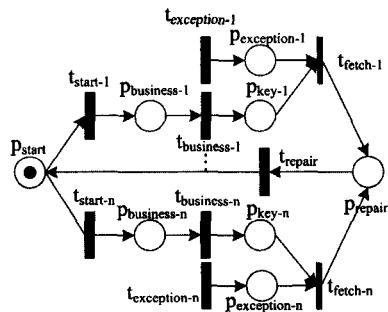


图4 串联结构异常处理模型

图 4 中, p_{key-1}, p_{key-n} 为所有可能会出现异常的库所, 当系统出现异常即 $t_{exception-1}, t_{exception-n}$ 以一定概率触发的时候, p_{key-1}, p_{key-n} 将转入异常处理 $p_{repair-o}$

4.1.3 并联结构异常处理模型

并联结构异常处理模型, 指若异常出现在两个或两个以上异常部件中且每个出现异常的部件都有自己的修复部件, 当所有的异常部件修复成功之后系统即可恢复正常的异常处理模型, 如图 5 所示。

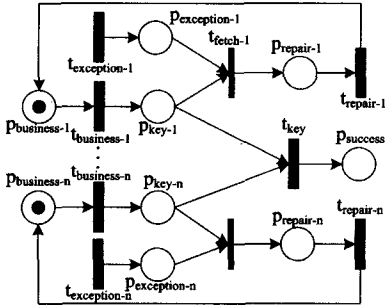


图 5 并联结构异常处理模型

图 5 中, p_{key-1}, p_{key-n} 为所有可能会出现异常的库所, 当系统出现异常即 $t_{exception-1}, t_{exception-n}$ 以一定概率触发的时候, p_{key-1}, p_{key-n} 将转入各自的异常处理部件 $p_{repair-1}, p_{repair-o}$

5 ELMS 实例可信赖性分析

ELMS (E-Business Logistics Management System) 是一种新型的电子商务模式。这种模式使得物流系统中的供应商与门店之间不再建立直接连接, 而是通过 ELMS 提供的网络服务来实现物流配送系统的各种需求。在这种新型的模式中, ELMS 提供了一种服务平台, 该平台将为各个服务供应商以及门店用户提供信息流、资金流、物流等各种保障, 以确保整个物流系统安全、高效地运行。供应商将能够提供的各种服务发布到 ELMS 系统中进行统一的管理, 而门店用户不再向单个具体的供应商请求服务, 而是通过 ELMS 系统获取完整的物流配送服务, ELMS 将保证门店用户服务请求与供应商服务请求都能获取最优的服务。

本文主要以 ELMS 中的补货活动为例, 对补货流程 (如图 6 所示) 进行了 SPN 建模, 随后对模型引入了异常处理, 最后对引入异常处理前后的模型的可信赖性参数进行了对比和分析。

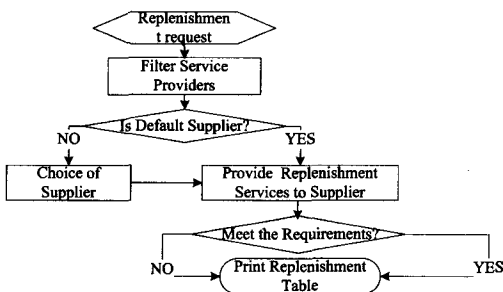


图 6 补货任务流程图

5.1 流程建模

通过参考以上的 ELMS 补货任务流程图, 首先给出了利用 SPN 建模的基本模型图, 基本模型中并未加入异常处理操作, 如图 7 所示。

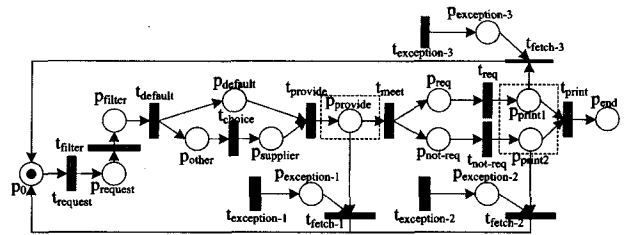


图 7 补货任务简单模型

图 7 中, 由于没有引入异常处理操作, 因此当有异常出现的时候, 流程将重新执行。然后, 给出了将异常处理操作引入之后的流程模型, 如图 8 所示。

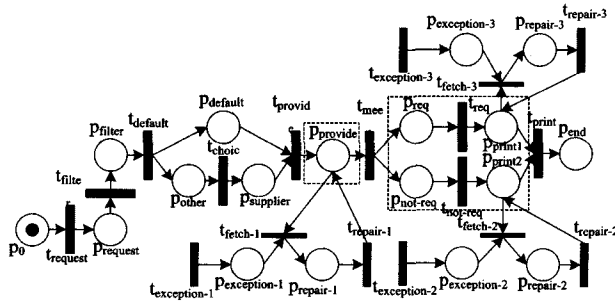


图 8 补货任务异常处理模型

从图 8 可知, 在可能会出现异常的几个关键位置引入异常处理单元之后可以得出以上图形。

5.2 可信赖性参数求解

完成随机 Petri 网对系统的可信赖性建模之后, 便可根据可达图获得与 SPN 模型同构的 MC。假设 MC (Markov chain 简称 MC) 中 n 个状态的稳定状态概率是一个行向量 $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, 且每个变迁的延迟服从于指数分布函数。根据马尔可夫过程有下列线性方程组

$$\begin{cases} \Pi \times Q = 0 \\ \sum_{i=0}^n \pi_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

解此线性方程组, 即可得每个可达标识的稳定概率 $P_i (i = 0, \dots, n)$ 。

另一方面, 对任一标识 $M_i \in [M_0]$, 所有 $M_j, M_k \in [M_0]$ 且 $M_i \in [t_j > M_j, M_k \in [t_k > M_k]$, 则有方程

$$(\sum_j \lambda_j) \pi_i = \sum_k \lambda_k \pi_k \quad (2)$$

显然, 可用上式列出 $n-1$ 个平衡状态方程, 再加上方程 $\sum \lambda_j = 1$, 即可求解每个可达标识的稳定概率。基于上述马尔可夫链和状态转换速率, 能够制造状态转换矩阵并获得所有状态的稳定状态概率, 在求得稳定概率的基础上, 便可以进一步分析人们关心的稳定状态的可信赖性参数。

下面以上一节介绍的补货系统为例介绍系统的可靠性、可用性、MTTR、MTBF 以及可运行性的求解。

可靠性: 求解可靠性时, 可以假设系统有 n 个状态, 前 t 个连续的正常工作状态是非吸收态, 后 a 个状态为吸收态 (故障态)。这样只需考虑系统的处于吸收状态时的可靠性, 即:

$$R(t) = P_0(t) = \exp(\lambda t) = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t) \quad (3)$$

MTTF: 当部件失效服从指数分布时, $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$, 则:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t) dt = \lambda^{-1} \quad (4)$$

可维护性:为求得系统的可维护性 $M(t)$,先定义系统的修复率 $\mu(t)$,它表示修理时间已达到某个时刻但尚未修复的资源,在该时刻后的单位时间内完成修复的概率可表示为:

$$\mu(t) = \frac{1}{1-M(t)} \frac{dM(t)}{dt} \quad (5)$$

则由式(5)可得

$$M(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right) \quad (6)$$

当 $\mu(t)$ 为常数时,式(6)可写为

$$M(t) = 1 - \exp(-\mu t) \quad (7)$$

MTTR:系统的平均修复时间可表示为

$$MTTR = \lambda / \rho = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n (\lambda_i / \mu_i)} \quad (8)$$

其中, $\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$ 为系统维修系数, $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ 为第 i 个部件的维修系数。

MTBF:系统的平均故障间隔时间可近似等于正常工作时间与在此段时间内故障次数之比

$$MTBF = t / N_f(t) \quad (9)$$

可用性:系统的稳态可用性为状态 M_0 的稳定概率

$$A_s = \pi_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^{-1} = \left(1 + \sum_{i=1}^n \rho_i\right)^{-1} = (1 + \rho)^{-1} \quad (10)$$

下面以可靠性和平均修复时间为例,对比简单及异常处理模型在订单流入速率逐渐增加情况下的可靠性和平均修复时间,图9和图10中 Simple 表示简单模型,Exception 表示异常处理模型。

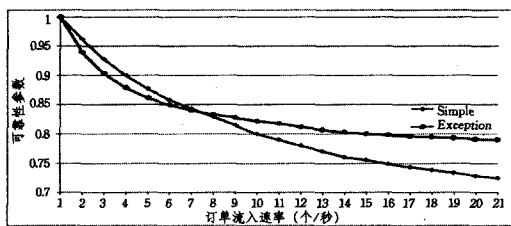


图9 可靠性对比图

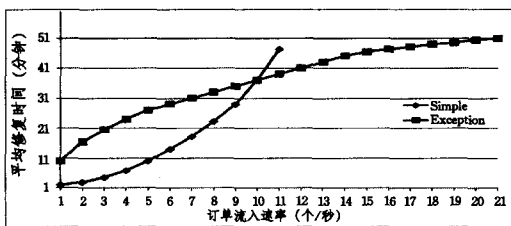


图10 平均修复时间对比图

从图9和图10中可以看出订单流入速率相同的情况下,异常处理模型在可靠性和平均修复时间方面均优于简单模型。

结束语 本文简要介绍了支持异常处理操作的柔性 workflow 及其特点,随后以 ELMS 的补货流程为例,给出了该流程基于 SPN 的简单流程模型和引入异常处理操作的柔性流程模型,在异常产生速度逐渐增加的情况下,通过对比二者的可信性参数,发现随着异常产生的增加,支持异常处理操作的柔性 workflow 的性能要优于普通的工作流系统。作者将进一步研究支持异常处理的柔性 workflow。

参考文献

- [1] 林闯,王元卓,杨扬,等.基于随机 Petri 网的网络可信性分析方法研究[J].电子学报,2006,34(2):322-332
- [2] Barlow R E. Mathematical theory of reliability: A historical perspective [J]. IEEE Trans on Reliability, 1984, 33(1): 16-20
- [3] Algirdas A, Laprie J-C, Randell B, et al. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2004, 1(1): 11-33
- [4] Avizienis A, Laprie J, Randell B. Fundamental Concepts of Dependability [R]. LAAS2CNRS, N01145. Apr. 2001
- [5] NUTTGJ. The evolution towards flexible workflow systems [J]. Distributed System Engineering, 1996, 3(4): 276-294
- [6] Han Y, Sheth A, Bussler R C. A taxonomy of adaptive workflow management [A]//Workshop in Conference on Computer Supported Cooperative Work: Towards Adaptive Workflow Systems [C]. Seattle, USA: ACM Press, 1998
- [7] Kammer P J, Bolcer G A, Taylor R, et al. Techniques for supporting dynamic and adaptive workflow [J]. Computer Supported Cooperative Work, 2000, 9(3/4): 269-292
- [8] Sadiq S. On capturing exceptions in workflow process models [A]//Proceedings of the 4th International Conference on Business Information Systems [C]. Poznan, Poland: Springer-Verlag, 2000
- [9] Casati F. A discussion on approaches to handling exceptions in workflows [A]//Proceedings of the International Conference on Computer - Supported Cooperative Work, workshop on Adaptive Workflow Systems [C]. Seattle, USA: ACM Press, 1998
- [10] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 清华大学出版社, 2000: 93-125
- [11] Lin C, Sheng L J, Wu J P, et al. An integrative scheme of differentiated service: modeling and performance analysis [A]//Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2000. Proceedings, 8th International Symposium on [C]. Book, News, Inc, Portland, OR: IEEE, 2000: 441-448
- [12] 林闯. 一种资源共享系统的模型和近似性能分析 [J]. 计算机学报, 1997, 20(10): 865-871
- [13] Workflow Management Coalition. The workflow reference model [Z]. WFMC - TC00 - 1003. 1995
- [14] 田立勤, 林闯, 周文江. 随机 Petri 网模型中变迁的串并联性能等价化简技术 [J]. 电子学报, 2002, 30(8): 1134-1137
- [15] Ciaodo G, Muppala J, Trivedi K S. SPNP: Stochastic Petri Net Package [A]//Proc. Petri Nets and Performance Models [C]. 1989: 142-151

(上接第 30 页)

- [31] Romeiro F, Velho L. Computer Graphics Brazil: Scalable GPU rendering of CSG models [J]. Computers and Graphics, 2008, 32(5)
- [32] Ritschel T. Imperfect shadow maps for efficient computation of indirect illumination [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-8
- [33] Cheslack-Postava E, Wang Rui. Fast, realistic lighting and material design using nonlinear cut approximation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-10
- [34] Lehtinen J, Zwicker M. A meshless hierarchical representation

for light transport [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9

- [35] Pacanowski R, Raynaud M. Efficient streaming of 3 D scenes with complex geometry and complex lighting [C]//Proceedings of the 13th International Symposium, 2008: 11-17
- [36] Ritschel T, Grosch T. Interactive global illumination based on coherent surface shadow maps [C]//Proceedings of graphics interface 2008. 2008: 185-192
- [37] 任重, 周昆. 复杂环境光源下的动态场景实时绘制算法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 8(8)
- [38] 孙鑫, 周昆, 石教英. 可变材质的实时全局光照照明绘制 [J]. 软件学报, 2008, 19(4)