

workflow 系统模型的性能等价分析*

林 闯, 田立勤, 魏丫丫

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

E-mail: chlin@tsinghua.edu.cn; {lqtian,yywei}@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

http://www.tsinghua.edu.cn

摘要: 讨论了基于随机 Petri 网的工作流系统的顺序、并行、选择、循环 4 种基本模型,并详细推导了这 4 种基本模型的性能等价公式.最后通过现实中的一个工作流实例来说明如何建立相应的随机 Petri 网模型,以及如何利用这些性能等价公式来计算工作流的性能参数.给出了定量分析工作流系统性能的通用方法,通过用这些等价公式不仅可以对复杂的系统进行性能等价化简,而且还可以得到性能参数的乘积解.

关键词: 工作流;随机 Petri 网模型;性能等价;性能分析

中图法分类号: TP302, TP391 文献标识码: A

最近几年, workflow 技术的研究和应用已引起了研究人员、开发人员和用户的普遍关注^[1,2],诸如计算机支持的协同工作、无纸办公、表单传递、协作系统和办公自动化等.业务流程建模是 workflow 描述的重要内容,模型的性能评价是 workflow 系统研究和应用的主要理论基础和支撑技术,因此对模型的性能分析是 workflow 的一个重要研究内容.有很多文献讨论了 workflow 系统模型的性能^[3-7],但都是针对 workflow 某一方面的特性来分析或改进 workflow 的性能,如文献[6]根据客户服务器这种 workflow 模型来对 workflow 的性能进行分析;文献[7]根据具有时间限制的这种 workflow 模型来对 workflow 的性能进行分析.本文则根据基于随机 Petri 网的工作流模型的顺序、并行、选择、循环 4 种基本结构,推导出由任意多个变迁组成的串联、并联、选择和循环结构的性能等价公式,给出了定量分析 workflow 系统性能的通用方法.这一技术除了可以应用在 workflow 系统中以外,还可以广泛应用在诸如多媒体系统、计算机网络等模型的性能分析中.

1 workflow 的 4 种基本随机 Petri 网模型及其性能等价公式的证明

1.1 模型及前提假定

本文 workflow 模型描述是基于随机 Petri 网的,且通常都假设 workflow 模型的变迁延时是服从指数分布函数的,因为这种假定本身是与现实多数系统实际相符合的.关于随机 Petri 网的更详细的内容,读者可参阅文献[8]. workflow 主要由 4 种基本模型组成,即串联模型、并联模型、选择模型、循环模型^[9].

1.2 workflow 的串联随机 Petri 网模型及其性能等价公式的证明

串联随机 Petri 网模型用来定义 workflow 中一系列按固定顺序执行的活动,如图 1 左端所示,其中 t_1, t_2, \dots, t_n 是 n 个串行执行的时间变迁.为了简化模型的复杂性,可将 n 个变迁进行性能等价化简,化简后的模型如图 1 右端

* 收稿日期: 2001-11-26; 修改日期: 2002-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60173012,90104002);国家重点基础研究发展规划 973 资助项目(G1999032707);国家高科技研究发展计划资助项目(2001AA112080)

作者简介: 林闯(1948 -),男,辽宁沈阳人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为系统性能评价,计算机网络,随机 Petri 网,逻辑推理模型;田立勤(1970 -),男,陕西定边人,讲师,主要研究领域为计算机网络, workflow 模型,系统性能评价;魏丫丫(1979 -),女,湖北荆州人,博士,主要研究领域为系统性能评价,计算机网络,随机 Petri 网.

所示.

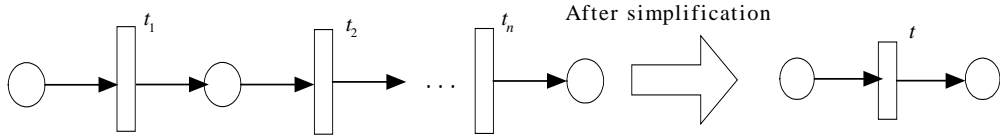


Fig.1 The sequent model based on stochastic Petri nets and its performance equivalent model

图 1 基于随机 Petri 网的工作流的串联模型及其性能等价模型

下面推导由 n 个变迁串联组成的系统的性能等价公式.

定理 1. 由 n 个变迁串联组成一个系统 B , 设这 n 个串联变迁的延时时间为 n 个相互独立的随机变量, 且分别服从参数为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的指数分布函数, 即 n 个变迁的平均延时时间分别为 $\frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}, \dots, \frac{1}{\lambda_n}$, 则这 n 个变迁总的等价延时时间为

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \tag{1}$$

证明: 首先推导由两个变迁 t_1, t_2 组成的串联子系统 B_2 的性能等价公式.

为了求两个变迁串联的性能等价公式, 将这两个变迁组成一个活的、标记守恒的分析系统, 如图 2 所示, 位置 S_1 中设置了一个初始标记.

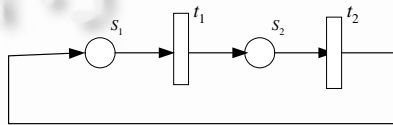


Fig.2 Two transitions consist of a active and token conservation analytical system

图 2 两个变迁串联组成一个活的、标记守恒的分析系统

解此分析网, 可有如下结果:

状态	S_1	S_2	稳定概率	马尔可夫链(MC)
M_0	1	0	p_1	
M_1	0	1	p_2	

得稳定状态方程:

$$\begin{cases} \lambda_1 p_1 = \lambda_2 p_2 \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$$

求解稳定状态概率:

$$p_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

求得图 2 分析网的标记流平均输入速率: $\lambda = \lambda_1 p_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$.

由于此分析网中有一个 S -不变量包括所有位置, 所以此分析网所含标记数量就是初始标识中的标记数量 1. 由 Little^[8]式可知, λ 就是变迁串联分析网的平均实施速率, 则图 2 分析网的一个标记平均延时时间为

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

可以看出, 当分析网是由一系列变迁 t_i 串联 ($1 \leq i \leq k$) 组成时, 它的等价变迁 t 的平均实施速率 λ 可由以下公式给出:

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\lambda_i}$$

其中 λ_i 是分析网中与变迁 t_i 相联系的平均实施速率.

下面证明由 n 个变迁串联组成的性能等价公式.

前面已证明当 $k=2$ 时,确有 $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$,表明式(1)在 $k=2$ 时正确.现用数学归纳法对由 n 个变迁串联组成的模型进行证明.假定 $k=n-1$ 时式(1)成立,亦即有

$$\frac{1}{\lambda'} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\lambda_i}.$$

可将 $n-1$ 个变迁使用一个非基本变迁^[8]替代, t' 的实施速率为 λ' .当 $k=n$ 时,可将子网看成由变迁 t' 和 t_n 组成,因已证明 $k=2$ 时成立,所以有

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda'} + \frac{1}{\lambda_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}. \quad \square$$

1.3 工作流的并联随机Petri网模型及其性能等价公式的证明

并联随机 Petri 网模型用来定义工作流中没有严格执行顺序、可同时进行分支活动.其模型如图 3 左端所示,它表示 n 个变迁 t_1, t_2, \dots, t_n 从瞬时变迁 t_{start} 处开始并行执行,到瞬时变迁 t_{end} 同步后结束.化简后的性能等价模型如图 3 右端所示.

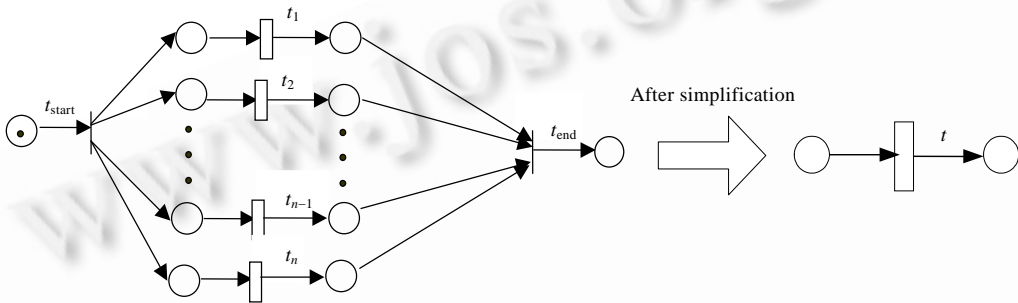


Fig.3 The parallel model based on stochastic Petri nets and its performance equivalent model

图 3 基于随机 Petri 网的工作流的并联模型及其性能等价模型

下面推导由 n 个变迁 t_1, t_2, \dots, t_n 组成的并联模型总的性能等价延时时间,先给出下面的引理.

引理. 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是 n 个独立的顺序统计量,关于顺序统计量的更详细的内容,读者可参阅文献[10],其分布函数分别设为 $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$,用 $F_r(t)(r=1, 2, \dots, n)$ 表示第 r 次统计量 $X_{(r)}$ 的分布函数,则最大次的统计量的分布函数为 $P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t)$.

证明:因为所求的是最大次的统计量的分布函数,所以有

$$F_n(t) = \Pr\{X_{(n)} \leq t\} = \Pr\{\text{所有的 } X_i \leq t\}.$$

又因为 X_1, X_2, \dots, X_n 是 n 个独立的随机变量,所以上式为 $P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t)$. □

定理 2. 设 n 个并联变迁的延时时间为 n 个相互独立的顺序统计量 X_1, X_2, \dots, X_n ,且分别服从参数为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的指数分布函数,则这 n 个并联变迁总的平均等价延时时间为

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_i \lambda_i}. \quad (2)$$

证明:因为 n 个相互独立的顺序统计量 X_1, X_2, \dots, X_n 分别服从参数为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的指数分布函数,即其分布函数分别为 $P_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t}, P_2(t) = 1 - e^{-\lambda_2 t}, \dots, P_n(t) = 1 - e^{-\lambda_n t}$. 设 n 个并联变迁组成的系统 B 的性能等价延时为 y , 由 n 个变迁并联所组成的系统总的延时的物理意义及引理可知,该子系统 B 的分布函数为

$$F_B(y) = F_{X_{(n)}}(y) = \Pr\{X_{(n)} \leq y\} = \Pr\{\text{所有的 } X_i \leq y\} = (1 - e^{-\lambda_1 y})(1 - e^{-\lambda_2 y}) \dots (1 - e^{-\lambda_n y}).$$

其概率密度为

$$f_B(y) = F'_B(y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i e^{-\lambda_i y} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (\lambda_i + \lambda_j) e^{-(\lambda_i + \lambda_j)y} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n (\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k) e^{-(\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k)y} + \dots + (-1)^{n-1} \sum_{i=1}^n (\lambda_i) e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i y}$$

则性能等价延迟的期望值为

$$E(y) = \int_0^\infty y f_B(y) dy = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad \square$$

1.4 工作流的选择随机Petri网模型及其性能等价公式的证明

选择模型用来定义彼此之间相互制约与排斥关系的分支活动,这类分支活动往往根据具体的执行情况从多个分支选择一个分支执行,如图 4 左端所示.化简后的性能等价模型如图 4 右端所示.

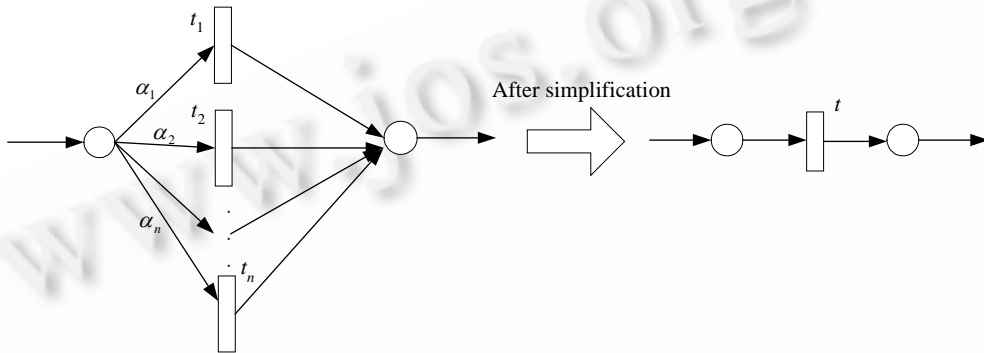


Fig.4 The choice model based on stochastic Petri nets and its performance equivalent model

图 4 基于随机 Petri 网的工作流的选择模型及其性能等价模型

下面通过一个定理给出工作流选择模型的性能等价公式.

定理 3. 设 n 个选择变迁 t_1, t_2, \dots, t_n 的延时时间为 n 个相互独立的随机变量 $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_n$, 且分别服从参数为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的指数分布函数, 并设执行变迁 t_i 的概率为 $\alpha_i, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$, 则这 n 个选择变迁总的平均等价延时时间 $\frac{1}{\lambda}$ 等于 $\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\lambda_i}$.

证明: 设 n 个选择变迁组成的子系统 B 的性能等价延时为 y, y 是 n 个变迁中的任意一个变迁的延时时间, 现引入一个随机变量 \hat{I} , 用它来决定执行哪个变迁, 当 $\hat{I} = t_i$ 时, 其概率为 α_i . 记为 $P(\hat{I} = t_i) = \alpha_i$. 其概率事件可以用下列公式进行描述:

$$\bigcup_{i=1}^n ((\hat{I} = t_i) \cap (\hat{t}_i = y)),$$

又因为 $\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_n$ 是 n 个独立的随机变量, 所以该系统 B 的总的延时时间的概率密度函数为

$$f_B(y) = \sum_{i=1}^n P(\hat{I} = t_i) f_{t_i}(\hat{t}_i = y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i e^{-\lambda_i y},$$

则性能等价延迟的期望值为

$$E(y) = \int_0^\infty y \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i e^{-\lambda_i y} dy = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\lambda_i} \quad (3) \quad \square$$

1.5 工作流的循环随机Petri网模型及其性能等价公式的证明

循环随机 Petri 网模型是用来定义需要重复执行多次的活动, 变迁 t_1 执行结束后, 有一个重要的分支选择,

要么返回执行变迁 t_2 ,接着重复执行变迁 t_1 ;要么结束由变迁 t_1 和 t_2 所组成的循环,继续执行下一个流程.其模型如图 5 左端所示,化简后的性能等价模型如图 5 右端所示.

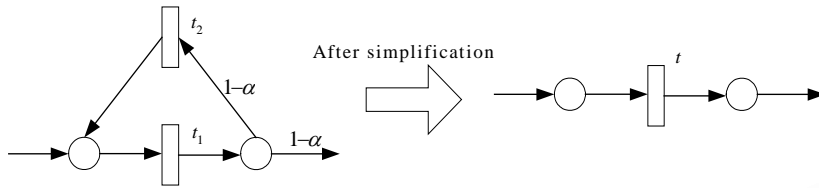


Fig.5 The iterative model based on stochastic Petri nets and its performance equivalent model α

图 5 基于随机 Petri 网的工作流的循环模型及其性能等价模型

下面通过一个定理给出循环随机 Petri 网模型的性能等价公式.

引理.^[11] 设两个循环变迁 t_1, t_2 的延时时间为两个相互独立的随机变量 \hat{t}_1, \hat{t}_2 , 并假设执行完变迁 t_1 后,返回循环执行变迁 t_2 的概率为 α ,则这两个循环变迁总的平均等价延时时间为

$$\frac{E\hat{t}_1 + \alpha E\hat{t}_2}{1 - \alpha}$$

定理 4. 设两个选择变迁 t_1, t_2 的延时时间为两个相互独立的随机变量 \hat{t}_1, \hat{t}_2 , 且分别服从参数为 λ_1, λ_2 的指数分布函数,并假设执行完变迁 t_1 后,返回循环执行变迁 t_2 的概率为 α ,则这两个循环变迁总的平均等价延时时间 $\frac{1}{\lambda}$ 等于 $\frac{\lambda_2 + \alpha\lambda_1}{(1 - \alpha)\lambda_1\lambda_2}$.

证明:因为两个相互独立的随机变量 \hat{t}_1, \hat{t}_2 分别服从参数为 λ_1, λ_2 的指数分布函数,即两个变迁的平均延时时间分别为 $\frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}$, 相当于已知引理中的 $E\hat{t}_1 = \frac{1}{\lambda_1}, E\hat{t}_2 = \frac{1}{\lambda_2}$, 由引理可知,循环变迁总的平均延时时间为

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\frac{1}{\lambda_1} + \alpha \frac{1}{\lambda_2}}{1 - \alpha} = \frac{\lambda_2 + \alpha\lambda_1}{(1 - \alpha)\lambda_1\lambda_2} \tag{4}$$

□

下面以某电脑公司计算机销售过程的工作流^[9]为例来说明如何利用这些性能等价公式进行性能分析.

2 一个基于随机 Petri 网的工作流系统的性能分析实例

2.1 实例的模型介绍及其流程图

整个流程通过以下活动完成销售业务过程.

(1) 用户通过 Internet 或其他方式向公司发出订单,指出所需要的计算机基本配置和数量,在随机 Petri 网模型中用变迁 t_0 表示;

(2) 公司接收用户订单,在模型中用变迁 t_1 表示;

(3) 公司对用户订单进行检查,即指以下 3 个活动的并发过程,可用一个瞬时变迁表示:

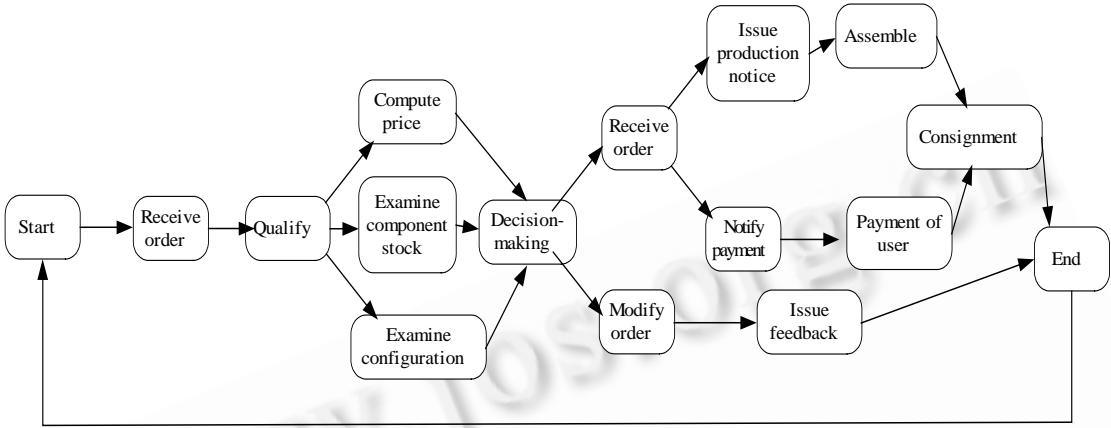
- 计算价格,在模型中用变迁 t_2 表示;
- 检查零部件库存是否满足需求,在模型中用变迁 t_3 表示;
- 进行配置检查,确认用户的订单技术上是否可行,在模型中用变迁 t_4 表示;

(4) 进行决策,在模型中用变迁 t_5 表示:

- 如果通过检查,则继续执行;
- 如果未通过检查,则向用户发出信函,解释为什么订单不能完成,并提出修改意见,修改订单,在模型中用变迁 t_{10} 表示,接着交给办事员发出反馈意见,在模型中用变迁 t_{11} 表示;

(5) 准备接收订单的确认通知,即指一方面通知用户付款,另一方面发出生产通知的两个并行过程,它本身可用一个瞬时变迁表示.通知用户付款,在模型中用变迁 t_8 表示;

- (6) 用户接到通知,进行付款,在模型中用变迁 t_9 表示;
- (7) 发出生产通知,在模型中用变迁 t_6 表示;
- (8) 装配计算机,在模型中用变迁 t_7 表示;
- (9) 发货,在模型中用变迁 t_{12} 表示.这个销售的整个过程流程图如图 6 所示.



开始, 接受用户订单, 用户资格审查, 计算价格, 检查部件库存, 检查配置, 决策, 接受订单, 修改订单, 发出生产通知, 通知用户付款, 进行装配, 用户付款, 发货, 发出反馈意见, 结束.

Fig.6 The process of selling computers

图 6 计算机销售过程的工作流程

2.2 相应的随机Petri网模型及变迁延迟时间的假定

相应的随机 Petri 网模型如图 7 所示.需要说明的是,在工作流中需要执行时间的模块用时间变迁表示,不需要执行时间的模块可用瞬时变迁或根据具体情况省略,为了与并行随机 Petri 网模型相对应,也可加入瞬时变迁,各个变迁的功能描述见模型的介绍,其中用户资格审查模块就是指计算价格、检查零部件库存是否满足需求以及进行配置检查、确认用户的订单在技术上是否可行这 3 个模块.所以,在随机 Petri 网模型中没有用时间变迁表示出来,可以把它看成是瞬时变迁,不影响最终的结果.接受订单模块的情况也是如此.现假设变迁 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}$, 平均延迟时间(单位为分钟)分别为 $\frac{1}{\lambda_0} = 38, \frac{1}{\lambda_1} = 15, \frac{1}{\lambda_2} = 8, \frac{1}{\lambda_3} = 30, \frac{1}{\lambda_4} = 20, \frac{1}{\lambda_5} = 40, \frac{1}{\lambda_6} = 5, \frac{1}{\lambda_7} = 120, \frac{1}{\lambda_8} = 40, \frac{1}{\lambda_9} = 2880, \frac{1}{\lambda_{10}} = 5, \frac{1}{\lambda_{11}} = 40, \frac{1}{\lambda_{12}} = 150$, 另外,在 t_5 处有个分支选择,设接收订单的概率 $\alpha_1=0.91$.下面计算整个过程的性能等价时间.

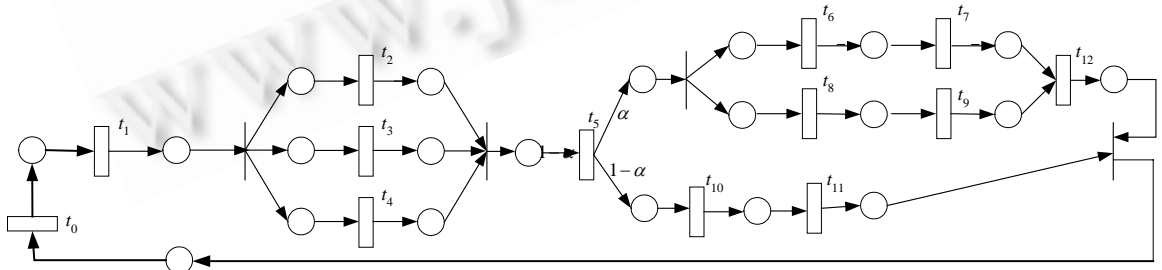


Fig.7 Fig.6 corresponding model based on stochastic Petri nets

图 7 与图 6 对应的随机 Petri 网模型

2.3 性能等价计算

化简计算的原则.

由里到外,即先化简包含在最里层的,它已经是4种基本结构中的一种结构,然后再由里向外逐步计算,经过不断的性能等价化简,由复杂到简单,最终求出整个系统的性能参数。

第1步.先根据串联的性能等价计算式(1)分别计算变迁 t_6, t_7 和变迁 t_8, t_9 串联后的性能等价时间,结果分别为 $\frac{1}{\lambda_{67}} = \frac{1}{\lambda_6} + \frac{1}{\lambda_7} = 125, \frac{1}{\lambda_{89}} = \frac{1}{\lambda_8} + \frac{1}{\lambda_9} = 2920$,其中 $\lambda_{67}, \lambda_{89}$ 表示性能等价后的新的变迁延迟时间的倒数,变迁 t_6, t_7 的等价变迁用 t_{67} 表示,以下同.再由并联的性能等价计算式(2)计算这两个新的变迁并联后的性能等价时间, $\frac{1}{\lambda_{6789}} = \frac{1}{\lambda_{67}} + \frac{1}{\lambda_{89}} - \frac{1}{\lambda_{67} + \lambda_{89}} = 125 + 2920 - \frac{1}{125 + 2920} = 3045.008$,等价化简后的随机 Petri 网模型如图8所示。

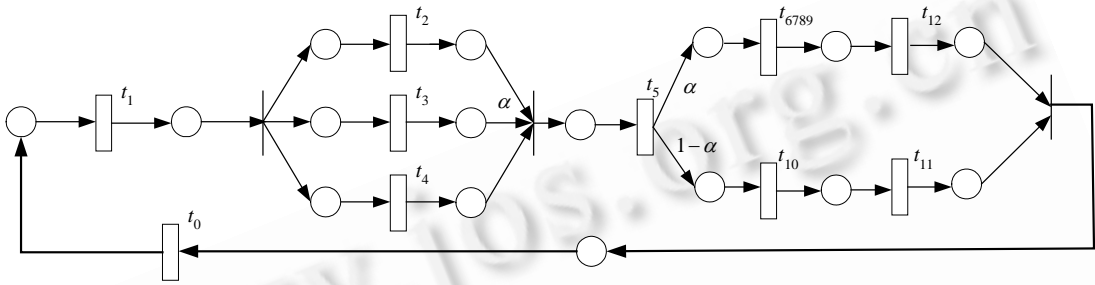


Fig.8 Transition t_6, t_7, t_8, t_9 are equivalently simplified into a transition t_{6789}

图8 变迁 t_6, t_7, t_8, t_9 等价化简为变迁 t_{6789} 的随机 Petri 网模型

第2步.由式(2) $\frac{1}{\lambda_{234}} = \frac{1}{\lambda_4} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_4 + \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_4 + \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_4 + \lambda_2 + \lambda_3}$ 求并联变迁 t_2, t_3, t_4 的性能等价时间,得到

$$\frac{1}{\lambda_{234}} = 8 + 30 + 20 - \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{30}} - \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{20}} - \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1}{30}} + \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{30} + \frac{1}{20}} = 38.7,$$

等价化简后的随机 Petri 网模型如图9所示。

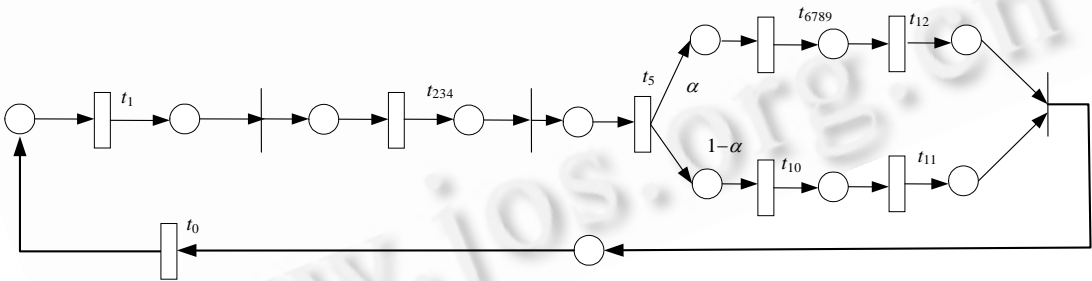


Fig.9 Transition t_2, t_3, t_4 are equivalently simplified into a transition t_{234}

图9 变迁 t_2, t_3, t_4 等价化简为变迁 t_{234} 的随机 Petri 网模型

第3步.利用串联的性能等价计算式(1)分别求得变迁 t_{6789} 与变迁 t_{12} 串联的性能等价时间,变迁 t_{10} 与变迁 t_{11} 串联的性能等价时间为

$$\frac{1}{\lambda_{678912}} = \frac{1}{\lambda_{6789}} + \frac{1}{\lambda_{12}} = 3195.008,$$

$$\frac{1}{\lambda_{1011}} = \frac{1}{\lambda_{10}} + \frac{1}{\lambda_{11}} = 45.$$

等价化简后的随机 Petri 网模型如图10所示。

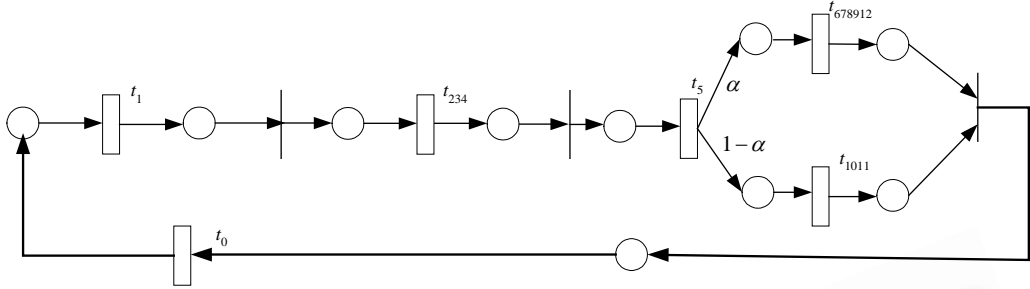


Fig.10 Transition t_{6789}, t_{12} are equivalently simplified into t_{678912} and t_{10}, t_{11} are equivalently simplified into t_{1011}

图 10 变迁 t_{6789}, t_{12} 等价化简为变迁 t_{678912} 及变迁 t_{10}, t_{11} 等价化简为变迁 t_{1011} 的随机 Petri 网模型

第 4 步.由式(3)计算由变迁 t_{6789} 和变迁 t_{1011} 组成的选择模型的性能等价时间为

$$\frac{1}{\lambda_{6789101112}} = \alpha_1 \frac{1}{\lambda_{678912}} + \alpha_2 \frac{1}{\lambda_{1011}},$$

得到

$$\frac{1}{\lambda_{6789101112}} = 0.91 \times 3195.008 + 0.09 \times 45 = 2911.507.$$

第 5 步.由串联式(1)求出总的性能等价时间为

$$\frac{1}{\lambda_{123456789101112}} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_{234}} + \frac{1}{\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_{6789101112}} = 38 + 15 + 38.77 + 40 + 2911.507 = 3043.277.$$

这样,我们使用 4 种模型的性能等价公式不断地对模型进行等价化简,最终求出了整个系统的性能等价时间.求出性能等价时间之后,我们就可以求其他的性能参数,如吞吐率、系统中平均任务数等.因为只有一个标记,所以吞吐率为等价时间的倒数,即 $\lambda_{123456789101112} = 3.29 \times 10^{-4}$ (任务/每分钟),一天内的平均处理任务数为 $24 \times 60 \times 3.29 \times 10^{-4} = 0.474$ (个).

3 结 论

workflow 模型的性能分析是 workflow 系统的一个非常重要的问题.对于一个实际的基于随机 Petri 网的 workflow 模型来说,状态空间往往是很大的,这给性能的分析带来很大的困难.应用本文给出的 workflow 的 4 种基本结构的性能等价公式,可对模型逐步进行性能等价化简,最终求出整个模型的性能参数.本文的贡献在于,对基于随机 Petri 网模型的 workflow 系统的性能分析提供有效的定量分析的方法,特别是得到了它们的性能等价公式.在大型 workflow 模型的性能分析中,利用这些性能等价公式,先化简包含在最里层的结构(它已经是 4 种基本结构中的一种结构),然后再由里向外逐步计算,经过不断的性能等价化简,最终求出整个系统的性能参数.所以,此方法在大型 workflow 模型的性能分析中仍然很有效.

References:

- [1] Salimifard, K., Wright, M. Petri net-based modeling of workflow systems: an overview. *European Journal of Operational Research*, 2001,134(3):664 ~ 676.
- [2] van der Aalst, W.M.P., ter Hofstede, A.H.M. Verification of workflow task structures: a Petri-net-based approach. *Information Systems*, 2000,25(1):43 ~ 69.
- [3] Kim, K., Ellis, C.A. Workflow performance and scalability analysis using the layered queuing modeling methodology. In: *Proceedings of the International ACM SIGGROUP Conference on Supporting Group Work*. 2001. 135 ~ 143.
- [4] Yamaguchi, S., Qi-Wei, G., Tanaka, M. Performance evaluation on change time of dynamic workflow changes. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2000,E83-A(11):2177 ~ 2187.

- [5] Jaeger, T., Prakash, A. Management and utilization of knowledge for the automatic improvement of workflow performance. In: Proceedings of the Conference on Organizational Computing Systems. 1995. 13 ~ 16. http://www.eecs.umich.edu/~aprakash/csrg_pub.html#WORKFLOW.
- [6] Kim, K., Han, D. Performance and scalability analysis on client-server workflow architecture. In: Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2001). 2001. 179 ~ 186. <http://intl.ieeexplore.ieee.org/Xplore/VSearch.jsp>.
- [7] Son, J.H., Kim, M.H. Improving the performance of time-constrained workflow processing. Journal of Systems and Software, 2000,58(3):211 ~ 219.
- [8] Lin, Chuang. The Performance Evaluation of Network and Computer System. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 230 ~ 237 (in Chinese).
- [9] Fan, Yu-shun. The Basis of Workflow Technology. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 140 ~ 144 (in Chinese).
- [10] Herbert, A.D. Order Statistics. 2nd ed, New York: Wiley InterScience, 1981. 18 ~ 45.
- [11] van Hee, M., Reijers, H.A. Using formal analysis techniques in business process redesign——business process management. In: van der Aalst, W., Desel, J., Oberweis, A., eds. Business Process Management—Models, Techniques and Empirical Studies. Springer-Verlag, 2000. 142 ~ 160.

附中文参考文献:

- [8] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价. 北京: 清华大学出版社, 2001. 230 ~ 237.
- [9] 范玉顺. workflow管理技术基础. 北京: 清华大学出版社, 2001. 140 ~ 144.

Performance Equivalent Analysis of Workflow Systems*

LIN Chuang, TIAN Li-qin, WEI Ya-ya

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

E-mail: chlin@tsinghua.edu.cn; lqtian@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn; yywei@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

<http://www.tsinghua.edu.cn>

Abstract: In this paper, four basic model of workflow systems are discussed based on SPN (stochastic Petri nets), and their performance equivalent equations are deduced. Finally, an example is given to explain how to model a workflow system based on SPN, and how to use those equations to compute their performance. By using these equations, not only the complex workflow model can be simplified but also the product-form solution of performance parameter of workflow model can be got.

Key words: workflow systems; stochastic Petri nets; performance equivalence; performance analysis

* Received November 26, 2001; accepted March 13, 2002

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60173012, 90104002; the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.G1999032707; the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA112080