

## workflow-赋权性能有色 Petri 网建模方法

杜轶波\*

(西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

(\* 通信作者电子邮箱 6855051@qq.com)

**摘要:**针对经典 Petri 网存在 workflow 无严格限制和定义,不同方式下变迁的托肯(Token)(包括了种类、数量、流向)绑定、后续库所到达以及对多性能描述与分析无法有效处理的问题,通过明确定义 Petri 网 workflow 结构、颜色集和加入多性能的衡量分析,提出 workflow-赋权性能有色 Petri 网。介绍了该方法的基本概念、权值向量和基本结构,并以危化品物流流程为实例,从时间和安全两个维度给出了危化品物流流程建模及性能测算方法;然后对危化品物流流程进行了建模、性能测算和分析,经测算其总体性能为 3.8094;最后利用筛选模型中各路径的时间性能和危险度的差路,找出制约危化品物流流程的瓶颈,从而证明该方法是 workflow 多性能分析的有效方法。

**关键词:** workflow; 赋权性能有色 Petri 网; 危化品物流; 流程建模; 多性能分析

**中图分类号:** TP311.52      **文献标志码:** A

## Workflow weighting colored Petri-net modeling method

DU Yibo\*

(School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** In the classical Petri-net, the workflow has no strict restrictions and definition, the transition token (including type, quantity, flow direction) binding and arriving of the subsequent places in different ways, and the description and analysis of multi-performance cannot be handled effectively. A workflow weighting colored Petri-net modeling method was proposed by defining the workflow structure and color set of Petri net and adding the multi-performance analysis. The conception, weight vector and the structure of the method were introduced, and the process of dangerous chemicals logistics was taken as an example to put forward a method of modeling and performance measurement of the process of dangerous chemicals logistics from two dimensions including time and safety. Then the method was used for modeling, measuring and analyzing performance of the process of dangerous chemicals logistics, the total value of performance was 3.8094. At last, by screening the weakness of local performance, bottleneck of process of dangerous chemicals logistics was found out, thus proves that the method is a scientific method for multi-performance analysis of workflow.

**Key words:** workflow; Weighting Colored Petri-net (WCP\_net); dangerous chemicals logistics; process modeling; multi-performance analysis

## 0 引言

Petri 网理论起源于 1962 年,从过程角度出发,为复杂系统的描述与分析设计的一种有效的建模工具,能自然描述系统元素的异步并发操作。Petri 网理论提出至今,其主要已发展为并发论、同步论、网拓扑、网逻辑等侧重方面的理论体系,应用涉及计算机、电子机械、化学、物理、能量等多个学科领域。

Aalst 等<sup>[1]</sup>于 1994 年提出了一种高级 Petri 网,提出了控制活动的概念,通过控制活动来安排过程中的工作项、工作的同步性和标识的复制, workflow 过程被定义成四个基本实体,每个实体的过程都可用一般 Petri 网建模。Moldt 等<sup>[2]</sup>于 2000 年提出了基于面向对象扩展 (Higher-Order Object Net, HOON) 的概念来对 workflow 过程进行建模,所有的对象模型在一个分布式的 Client/Server 环境中交互。Fershe<sup>[3]</sup>于 1994 年提出了用一般随机 Petri 网来表示 workflow 模型, workflow 中的每

个过程元素都用单独的变迁表示,用一般随机 Petri 网来表示过程元素之间的优先关系。Wei 等<sup>[4]</sup>于 2010 年在建立了物元 Petri 网理论的运算规则基础上,提出物元 Petri 网并发及冲突的分析方法,并给出了建模步骤;同时,通过实例验证了物元 Petri 网在具有多属性对象离散系统建模中的优势。Zhao 等<sup>[5]</sup>于 2010 年介绍了 Petri 网的存储机制,提出了基于 workflow 和 Petri 网分层建模的实施策略、操作步骤,并建立了仓储管理流程的模型实例。Chen 等<sup>[6]</sup>于 2008 年通过介绍相关的基于 Petri 网的工作流建模技术和描述 Petri 网到 workflow 过程模型执行的映射,给出了具体的基于 Petri 网建模方式的实例,最后利用随机 Petri 网和概率论的一些知识对该模型进行了时间性能分析。

当前 workflow 建模相关研究多以 Petri 网建模方法为基础,并应用于各领域中建模,以实现对各类动态流程抽象和仿真的目的。经典 Petri 网是简单的过程模型,主要存在有以下几点不足:1) 没有对 workflow 这类特殊性质的网络进行严格

的限制和定义,缺少对工作流特性的描述;2) 当出现变迁方式的不同,无法很好表示变迁绑定托肯(包括了种类、数量、流向)和到达后续库所不同的问题;3) 不能对性能进行描述,即便包括随机 Petri 网等此类高级网络,也只是简单对时间特性进行衡量。针对此类问题,本文加入多子性能衡量的思想,提出一种具备工作流多子性能分析能力的工作流-赋权性能有色 Petri 网,描述该方法的基本概念、权值向量和基本结构。

## 1 工作流-赋权性能有色 Petri 网

### 1.1 基本概念

**定义1** 赋权性能有色 Petri 网(Weighting Colored Petri-net, WCP\_net)。

赋权性能有色 Petri 网是一个  $t$  元组  $N = \langle P, T, pre, post, c, cd, \lambda \rangle$ 。其中:  $P$  是一个有穷集合( $N$  的库所集合);  $T$  是一个有穷集合( $N$  的变迁集合),且  $P \cap T = \emptyset$  及  $P$  和  $T$  不相交;  $C$  是颜色类集合;  $cd: P \cup T \rightarrow C$  是颜色域的映射;  $pre, post \in \beta^{[P] \times [T]}$  是矩阵( $N$  的向前和向后的关联矩阵),使得  $\alpha$  对于每一对  $(p, t) \in P \times T$ ,  $pre[p, t]: cd(t) \rightarrow Bag(cd(p))$  和  $post[p, t]: cd(t) \rightarrow Bag(cd(p))$  是映射;  $\lambda \in \alpha^{[T]}$  的向量(网的权值向量),  $\alpha$  对于每一个变迁  $C \in T$ , 都符合每种数学映射  $\lambda \rightarrow f(t, \lambda)$ 。

说明: 集合  $\beta$  可由形如映射  $f: cd(t) \rightarrow Bag(cd(p))$  组成的集合表示, 同样  $C = post - pre$  成为关联矩阵, 映射  $pre[p, t]: cd(t) \rightarrow Bag(cd(p))$  是为每一个变迁颜色  $\beta \in cd(t)$  定义一个包  $pre[p, t](\beta) \in Bag(cd(p))$ , 这表示变迁  $t$  以颜色  $\beta$  发生时, 库所  $P$  中消耗的托肯所组成的多重集。同样  $post[p, t]$  也类似。 $\lambda^{cd(t)} \rightarrow f(cd(t), \lambda)$  则为  $\lambda: cd(t) \rightarrow f(cd(t), \lambda)$  对于每一个变迁的性能指标都可用一个函数  $f(cd(t), \lambda)$  表示的性能分布函数。

**定义2** 工作流(Workflow-net, WF\_net)。

一个 Petri 网  $N = (P, T)$  是一个 WF\_net, 当且仅当: 1) 开始和结束: 业务流程的形式化模型中有且仅有两个特殊库所  $P_i$  和  $P_o$ , 且满足  $P_i = \emptyset, P_o = \emptyset$ , 即  $P_i$  为初始库所,  $P_o$  为终止库所。2) 强连通: 每一节点  $X \in P \cup T$  都在从  $P_i$  和  $P_o$  的一条路径上。

**定义3** 工作流-赋权性能有色 Petri 网(Workflow-Weighting Colored Petri-net, WF\_WCPn)。

WF\_WCPn 是 WCP\_net 的真子集, 可递归定义为:

- 1) 由一个基本结构组成的 WCP\_net 是 WF\_WCPn;
- 2) 用四种基本结构中的任何一种替换 WF\_WCPn 中的任何变迁所得 WCP\_net 是 WF\_WCPn, 且满足工作流的两个性质: a) 有且仅有一个开始和结束库所; b) 强连通性。

**定义4** 一个 WF\_WCPn 有效, 当且仅当以下条件成立:

- 1) 任何从初始库所  $I$  可达的库所  $M$ , 都可最终到达终止库所  $O$ , 即表示为:

$$\forall M(I \xrightarrow{*} M) \Rightarrow (M \xrightarrow{*} O) \quad (1)$$

- 2) 在由初始状态可达的所有状态中, 只有终止库所有结束托肯, 即有且只有一个起始和结束, 即表示为:

$$\forall M(I \xrightarrow{*} M \wedge M(O) \geq 0) \Rightarrow (M = O) \quad (2)$$

- 3) 未中止变迁即表示为:

$$\forall t \in T \exists M, M' I \xrightarrow{*} M \xrightarrow{t} M' \quad (3)$$

### 1.2 权值向量

$\lambda \in \alpha^{[T]}$  的向量(Petri 网  $\lambda$  的权值向量), 对于每一个  $t \in T$ , 其中  $\lambda(t)$  都符合某种数学映射:  $\lambda(t): cd(t) \rightarrow f(cd(t), t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ , 其中  $f(cd(t), t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  可理解为, 当变迁以颜色  $\beta \in cd(t)$  发生时, 总性能指标  $\lambda$  是由各子指标  $f_1(\beta, t, \lambda_1), f_2(\beta, t, \lambda_2), \dots, f_n(\beta, t, \lambda_n)$  进行加权所得, 而每一个性能指标均服从  $f(\beta, t, \lambda_i)$  的分布随机变量, 即:

$$f(t, cd(t), \lambda) = \alpha_1 f_1(\beta, cd(t), \lambda_1) + \alpha_2 f_2(\beta, cd(t), \lambda_2) + \dots + \alpha_n f_n(\beta, cd(t), \lambda_n) \quad (4)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1 \quad (5)$$

其中  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  是对每一个子性能函数的权值。

可以考虑每一个子性能之间是相互独立的, 则本文方法用均值来衡量整个 WF\_WCPn 的性能:

$$E(f(t, cd(t), \lambda)) = \alpha_1 E(f_1(t, cd(t), \lambda_1)) + \alpha_2 E(f_2(t, cd(t), \lambda_2)) + \dots + \alpha_n E(f_n(t, cd(t), \lambda_n)) \quad (6)$$

其中  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$ , 且对于每一个  $\alpha_i > 0$ , 可得

$$E(\lambda) = \alpha_1 E(\lambda_1) + \alpha_2 E(\lambda_2) + \dots + \alpha_n E(\lambda_n) \quad (7)$$

即整个性能为各子性能指标加权求和。

说明 1) 各子性能需统一归一化处理; 2) 对不同性能其随机变量的概率密函数不同, 则均值计算方法不同; 3) 综合性能指标分布函数可能较复杂, 可将其简化, 如采用指数分布函数等; 4) 其每个子性能的权值确定可采用主观赋权法, 如专家经验法, 亦可采用客观分析方法, 如层次分析法等。

### 1.3 基本结构

假设对于每个子性能  $\lambda_i$  的总性能指标服从指数分布(实际上具有意义的, 如时间性能、安全度性能均可近似表示), 各个变迁之间的性能分布为相互独立, 设变迁  $t_i$  的性能以  $1/\lambda_i$  的指数分布均值为  $\lambda_i$ 。根据有色 Petri 网的定义, 其工作流分别包括顺序、并行、选择和循环四种路由结构, 工作流的所有结构均可利用四种结构组合而成, 四种基本结构分别如图1所示。

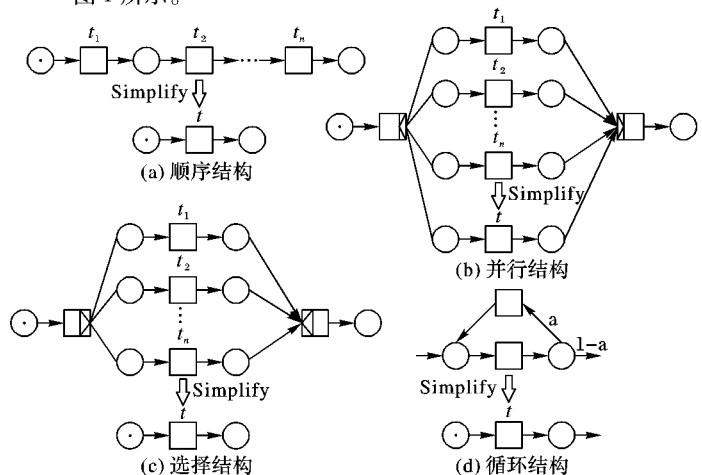


图1 赋权性能有色 Petri 网结构示意图

顺序结构等价均值为:

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

并行结构等价均值为:

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k} + \cdots + (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (9)$$

选择结构等价均值为:

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\lambda_i} \quad (10)$$

循环结构等价均值为:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1-\alpha} * \left( \frac{\alpha}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (11)$$

## 2 危化品物流基本流程

当前危化品物流流程为:危化品货主为物流委托方,向危化品物流服务机构提出业务申请;危化品物流服务机构为代理方,受理危化品委托方仓储运输代理业务,签订合同;委托方备货,代理方接受货物;委托方付费,代理方向委托方签发提单;物流代理方根据委托方要求编制仓储计划及运输组织计划,负责组织完成仓储和运输业务,具体仓储和运输业务交由相应业务单位具体执行,代理方负责对危化品物流全程的管理。危化品物流主体业务流程如图2所示。

## 3 危化品物流流程建模及性能测算方法

基于工作流-赋权性能有色 Petri 网的描述,及基本定义、权值向量和基本结构的讨论,利用该方法对危化品物流流程进行形式化描述并建模,同时构造赋权性能有色 Petri 网性能测算方法。危化品物流流程描述,可得 WF\_WCPn 模型,如图3所示。图3中, $t_1$ 至 $t_{29}$ 分别对应于图2中的危化品物流主体业务流程的变迁, $P_1$ 至 $P_{34}$ 分别对应于图2中危化品物流主体业务流程变迁发生的库所。其中变迁 $t_6$ 、 $t_7$ 、 $t_{13}$ 、 $t_{14}$ 、 $t_{17}$ 、 $t_{20}$ 、

$t_{21}$ 、 $t_{27}$ ,库所 $P_7$ 、 $P_{16}$ 、 $P_{22}$ 、 $P_{25}$ 为赋权性能有色 Petri 网模型描述并行状态连接转换关系符。

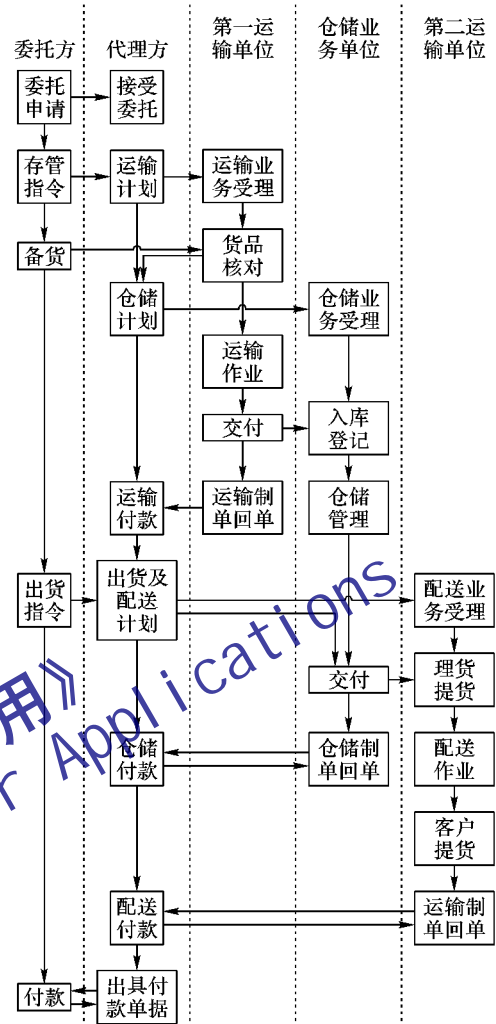


图2 危化品物流主体业务流程

经形式化定义后 Petri 网模型,如图4所示。

危化品物流流程 WF\_WCPn 模型不仅包括对应的库所和变迁,同时还需定义关联矩阵和颜色集,关联矩阵条件如表1~2所示。

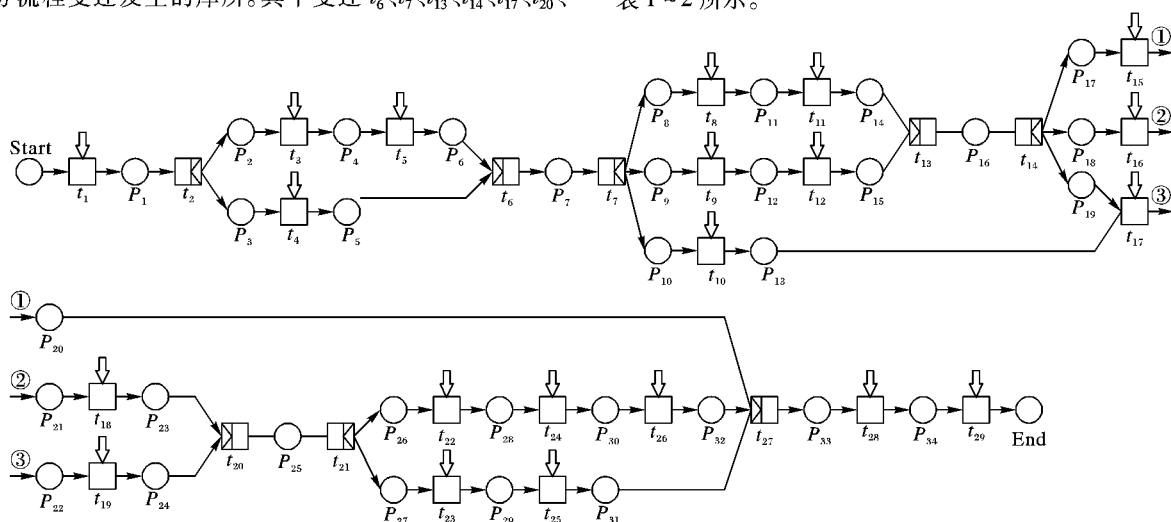


图3 危化品物流主业务流程 Petri 网模型

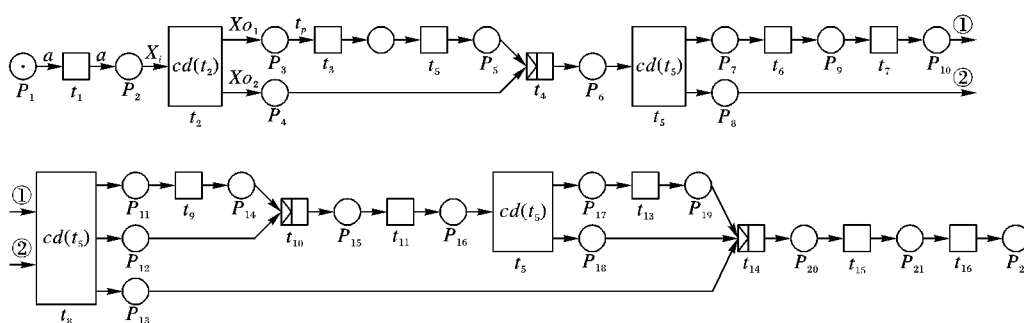


图 4 详细细节 Petri 网

表1 危化品物流流程 Petri 网输入矩阵

[illegible]

表2 危化品物流流程 Petri 网输出矩阵

[illegible]





的一路。如时间子性能,在 AND\_join 结构中需要所有支路都完成才能继续后续任务,所以性能差的一路是制约整个并行结构的瓶颈。但是,并行结构还是会极大提高整体性能。对于 OR 结构其主要是由条件决定路径,通常具有一个频繁执行的路径,如正常存储过程、正常情况的运输过程等,可通过借助信息化手段提高任务性能。

对该流程中第一个并行结果进行分析,可发现任务  $t_4$  的总性能为 0.57,其中时间子性能为 0.5,其危险度为 0.6,而  $t_3$  和  $t_5$  的总性能为 0.49,其中总的时间性能为 0.9,而危险度为 0.4。可看出在危险度上制约整体是  $t_4$  任务,而在时间上  $t_3$  和  $t_5$  链路上时间消耗很大。所以在整个并行上应该提高  $t_4$  的安全性,提高  $t_3$  和  $t_5$  的时间效率。照此结果分析可得到其他并行结构的瓶颈。

## 5 结语

工作流-赋权性能有色 Petri 网在总结经典 Petri 网的不足的基础上,加入多子性能衡量的思想,该方法具备工作流形式化建模和多性能分析的能力。危化品物流储运流程建模与性能测算过程,验证了工作流-赋权性能有色 Petri 网的实用性,符合危化品物流流程追求效率和保障安全性目标的要求,能够满足兼顾安全与效益工作流流程优化的需要,是工作流流程优化的有效模型工具。本文研究的工作流-赋权性能有色 Petri 网模型工具的多性能评价维度还可根据工作流目标需求的不同进行扩展研究。

### 参考文献:

- [1] van der AALST W M P, van HEE K M, HOUBEN G J. Modelling workflow management systems with high-level Petri nets [E/OL]. [2013-10-10]. <http://www.citeulike.org/user/lobeneyal/article/403740>.
- [2] MOLDT D, VALK R. Object oriented Petri nets in business process modeling [C]// Business Process Management, LNCS 1806. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 371-427.
- [3] FERSEH A. Business workflow analysis using generalized stochastic Petri net [C]// Proceedings of the 9th Austrian-Hungarian Informatics Conference, Workflow Management: Challenges, Paradigms and Products. Vienna: R Oldenbourg, 1994: 222-234.
- [4] WEI J, YANG J, LU H, et al. Application of matter-element Petri nets to modelling [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(2): 43-47. (魏军, 杨建军, 卢海翔, 等. 物元 Petri 网建模方法及其应用 [J]. 海军工程大学学报, 2010, 22(2): 43-47.)
- [5] ZHAO S, MA G, MAO H. Modeling and verification of inventory management based on layered Petri net [J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(12): 29-33. (赵珊, 马光恩, 毛宏燕. 基于分层 Petri 网的仓储管理建模与验证 [J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(12): 29-33.)
- [6] CHEN H, WANG X, ZOU K. Workflow process modeling based on Petri nets [J]. Computer Engineering and Science, 2008, 30(5): 92-94, 105. (陈慧灵, 王宪增, 邹宽城. 基于 Petri 网的工作流过程建模 [J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(5): 92-94, 105.)
- [7] KNORR K, WEIDNER H. Analyzing separation of duties in Petri net workflows [C]// Information Assurance in Computer Networks, LNCS 2052. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 102-114.
- [8] LAKOS C A. From coloured Petri nets to object Petri nets [C]// Application and Theory of Petri Nets, LNCS 935. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 278-297.
- [9] LIN C. Stochastic Petri net and system performance evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.)
- [10] YUAN C. The principle and application of Petri net [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. (袁崇义. Petri 网原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.)
- [11] SHU Y, LIU Y, PENG X, et al. Survey on object-oriented Petri net modeling [J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(15): 3432-3435. (舒远仲, 刘炎培, 彭晓红, 等. 面向对象 Petri 网建模技术综述 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(15): 3432-3435.)
- [12] QIN K, LIANG H. An approach of decomposition of workflow models based on Petri net [J]. Computer Technology and Development, 2008, 18(1): 97-100. (秦凯, 姜浩. 一种基于 Petri 网的工作流模型分解方法 [J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(1): 97-100.)
- [13] XIAO J, DENG H, GAO Y, et al. Workflow modeling and time performance analysis based on Petri net [J]. Journal of Jilin University: Information Science, 2009, 27(1): 104-112. (肖军, 邓海鸿, 高允锋, 等. 基于 Petri 网的工作流建模及时间性能分析 [J]. 吉林大学学报, 信息科学版, 2009, 27(1): 104-112.)
- [14] CAO Y, QIN X, ZHANG X. Product development process modeling based on polychromatic Petri net [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(5): 909-918. (曹宜英, 秦现生, 张晓云. 基于多色 Petri 网的产品开发过程建模 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 909-918.)
- [15] XU J, DU B. Workflow process model structure verification based on Petri net reduction techniques [J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(6): 51-54, 57. (徐晶明, 杜宝珠. 基于 Petri 网化简技术的工作流过程模型结构验证 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 51-54, 57.)
- [11] QIN K, XU K, LIU F L, et al. Image segmentation based on histogram analysis utilizing the cloud model [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2011, 62(7): 2824-2833.
- [12] ZHANG C, YU C, JIANG S, et al. Particle swarm optimization algorithm based on chaos cloud model [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(7): 1951-1954. (张朝龙, 余春日, 江善和, 等. 基于混沌云模型的粒子群优化算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1951-1954.)
- [13] LI D, LIU C, GAN W. Proof of the heavy-tailed property of normal cloud model [J]. Engineering Science, 2011, 13(4): 20-23. (李德毅, 刘常昱, 淦文燕. 正态云模型的重尾性质证明 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(4): 20-23.)
- [14] ARIFINA A Z, ASANO A. Image segmentation by histogram thresholding using hierarchical cluster analysis [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(13): 1515-1521.
- [15] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error measurement to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

(上接第 1769 页)