

任务关键系统的时间约束验证与最优路径分析

陈莹¹, 孙晓波¹, 邢建春¹, 杨启亮^{1,2}

(1. 解放军理工大学 国防工程学院, 南京 210007;

2. 南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要: 针对任务关键系统工作流程中对时间验证不够完善的问题, 提出一种新的 workflow 建模和时间验证方法。基于库所含时间因素的着色时间 Petri 工作流网, 将系统中的任务划分为关键任务和非关键任务, 对不满足时间约束的活动进行管理, 在完成最终任务的前提下, 尽可能多地执行工作流中的非关键任务, 从而减少时间资源的浪费。在此基础上, 将工作流中活动的时间约束转化为数学约束问题, 并运用 MATLAB 对模型进行分析, 最终得出工作流中的最优路径。对军港岸基保障信息系统案例进行分析, 结果表明, 该方法具有一定的可行性和实用性。

关键词: Web 服务组合; 任务关键系统; 时间验证; 最优路径; 着色时间 Petri 网

中文引用格式: 陈莹, 孙晓波, 邢建春, 等. 任务关键系统的时间约束验证与最优路径分析[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 60-65, 77.

英文引用格式: CHEN Ying, SUN Xiaobo, XING Jianchun, et al. Time Constraint Verification and Optimal Path Analysis of Mission Critical System[J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 60-65, 77.

Time Constraint Verification and Optimal Path Analysis of Mission Critical System

CHEN Ying¹, SUN Xiaobo¹, XING Jianchun¹, YANG Qiliang^{1,2}

(1. College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

[Abstract] Time verification is inadequate in workflows of Mission Critical System (MCS). To solve this problem, a new workflow modeling and time verification approach is proposed. Firstly, this approach divides the system tasks into mission critical ones and non-mission critical ones based on Place Containing the Time factor colored Petri-Workflow Net (PCTP-WFN), this can manage the activities which cannot meet the time constraint, and can execute non-mission critical tasks as many as possible on the premise of finishing the final tasks, which can thereby eliminate much wasted time in the MCS. Secondly, this approach transforms the time constraint of workflow activities into mathematical constraint, then uses MATLAB to analyze the models, and gets the optimal path finally. The example analysis of the shore-based facility security information system show that, the proposed approach is feasible and practicable.

[Key words] Web service composition; Mission Critical System (MCS); time verification; optimal path; Colored Time Petri Net (CTPN)

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046855

0 概述

任务关键系统^[1] (Mission Critical System, MCS) 广泛应用于武器装备、医疗设备、核电控制、工业控制等诸多国家关键信息领域。与传统安全保障系统相比, MCS 不仅可以大大提高系统的安全性, 而且能

够满足特定领域中高可信、高生存以及高可用的要求。但是, 尽管已经对 MCS 的模型进行了防御型建模和验证分析, 该系统也同样会遭受一定程度的损坏, 而且还会导致经济受到严重的破坏^[2]。因此, 如何保证所有关键任务按时完成, 并在此基础上去完成更多的非关键任务, 是该领域当今急需解决的一

基金项目: 国家自然科学基金“基于声表面波的埋入式钢筋锈蚀传感器研究”(51505499); 江苏省自然科学基金“面向开放环境的软件模糊自适应运行机理与构造方法”(BK20151451)。

作者简介: 陈莹(1991—), 女, 硕士研究生, 主研方向为任务关键系统建模与分析; 孙晓波, 硕士研究生; 邢建春, 教授、博士生导师; 杨启亮, 副教授。

收稿日期: 2017-04-18

修回日期: 2017-06-03

E-mail: chenying910814@163.com

个重要问题。

MCS 的建模问题本质上是一个工作流的建模问题。目前,工作流的建模技术主要有 Petri 网^[3-4]、进程代数^[5]和自动机^[6]等方法。从文献[7]的分析中发现,采用进程代数和自动机的方法对工作流进行建模时,会使模型相对复杂,建模的过程难度也较大。为了使得工作流的建模更简洁明了,本文采用着色时间 Petri 网(Colored Time Petri Net,CTPN)对 MCS 的工作流进行建模。

目前,工作流面临的重要挑战是其时间管理问题,工作流管理系统(Work Flow Management System,WFMS)针对该问题并未给出准确的定义。但是,在实际的运用中必须考虑时间约束下工作流的过程管理这一问题。为此,已有很多学者对时间约束验证进行了不同角度的研究^[8]。文献[9]针对时间推测方法的研究,给出了一套方案。针对一些复杂模型的建模与分析,文献[10-11]进行了相关研究。文献[8]提出了一种新的时间约束分析角度,通过引入延迟空间,从而对模型进行时间约束验证分析。此外,近些年也有一些学者对时间验证和最优路径做了相关研究,比如,文献[12]提出了一种直观方便的工作流模型静态时间验证方法,文献[13]提出了基于期限的反向优化算法(RRO),该算法通过逆向缩减得到最优路径。虽然上述研究对时间约束下的工作流过程进行了时间验证分析^[14],但这些方法并不能很好地运用在计算机的运行中^[15]。其中很多学者将工作流进行建模和时间验证,但未将两者与最优路径的分析相结合。

基于此,本文将 CTPN 的建模优势与工作流相结合^[15],建立一个库所含时间因素的着色时间 Petri 工作流网(Place Containing the Time factor colored time Petri-Workflow Net,PCTP-WFN),通过对工作流的基本结构进行分析,建立适合其基本结构的时间验证规则,并在有限时间约束下提出最优路径的分析策略。

1 相关概念

1.1 着色时间 Petri 网

着色时间 Petri 网是对一般 Petri 网的扩展,其将 Petri 网与程序元语言相结合,并以简洁明了的方式描述并发系统。时间 Petri 网(Time Petri Net,TPN)的定义由文献[16]提出,它将一个时间使能区间 $T[\alpha, \beta]$ 添加在 Petri 网中的变迁上,其中, α 和 β 分别表示当变迁 t 在标识 M 下具有发生权时 t 的最早和最晚触发时间。

目前,由各类含有时间因素的 Petri 网所建立的模型,一般都是将库所、变迁以及连接弧赋予时间

值^[17-19]。然而,变迁遵循瞬间触发性的原则,如果将时间值赋予在变迁上,便会违背该原则,并且无法用可达标识图来描述“某一活动正在运行中”这一状态^[20]。针对这一问题,本文运用库所含时间因素的着色 Petri 网(Place Containing the Time factor Colored Petri-Net,PCTP-Net)来对工作流过程进行建模与时间验证。PCTP-Net 的具体转换方式将在第 2.3 节做详细介绍。

定义 1 时间 Petri 网由一个五元组 $\Sigma = (P, T, F, M, I)$ 组成^[21]。五元组含义如下:

- 1) P : 描述系统库所(Place)的有限集合。
- 2) T : 变迁(Transition)的有限集合。
- 3) F : 弧(Arc)的有限集合,满足 $F \subseteq (P \times T \cup T \times P)$ 。
- 4) $M: P \rightarrow Z$ (非负整数集合)是位置集合上的标识向量。
- 5) I : 变迁集合上的时间区间函数 $T \rightarrow R_0 \times (R_0 \cup \{\infty\})$ 。

在一般情况下,用椭圆表示库所,用矩形表示变迁,用有向弧连接库所和变迁。

定义 2 一个库所含时间因素的着色 Petri 网是一个八元组, $PCTP-Net = (P, T, F, C, W, I, M, PT)$ 。八元组含义如下:

- 1) P : 描述系统库所(Place)的有限集合。
- 2) T : 变迁(Transition)的有限集合。
- 3) F : 弧(Arc)的有限集合^[22], 满足 $F \subseteq (P \times T \cup T \times P)$ 。
- 4) C : 色彩集,与每一个库所和变迁都关联。具体地说,库所 p_i 的色彩集为 $C(p_i) = \{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,ui}\}$, 其中, $ui = C(p_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$; 变迁 t_j 的色彩集为 $C(t_j) = \{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,vj}\}$, 其中, $vj = C(t_j)$, $j = 1, 2, \dots, m$ 。

5) W : 有向边集 F 向 k 维非负整数向量集的映射,即带颜色的权函数。

6) I : 变迁集 T 向 k 维非负整数向量集的映射,即带颜色的标识。

7) M : 库所集 P 向 k 维非负整数向量集的映射,即带颜色的权函数。

8) PT : 定义在库所集上的时间区间函数 $P \rightarrow R_0 \times R_0$, 其中, R_0 表示非负实数集。 $PT(p_j) = \{T[\alpha_1, \beta_1], T[\alpha_2, \beta_2], \dots, T[\alpha_k, \beta_k]\}$, 是所有库所的时间间隔,当 $\alpha_k = \beta_k = 0$ 时,该值可忽略不写。

定义 3 在一个 PCTP-Net 中,时间间隔 $[\alpha_k, \beta_k]$ 与每个库所 p_k 都关联,如 $PT(p_k) = T[\alpha_k, \beta_k]$ 。

α_k, β_k 具有如下含义:

- 1) α_k 和 β_k 都为已知时间。
- 2) α_k 和 β_k 分别为任务执行所需的最小时间和最大时间。
- 3) 若 p_k 的使能时间为一个确定的时间 T , 则库

所点火时间间隔为 $T[T + \alpha_k, T + \beta_k]$ 。

定义 4 一个库所含时间因素的着色时间 Petri workflow 网是一个九元组: $PCTP-WFN = (P, T, F, C, W, I, M_0, \Omega, PT)$ 。九元组含义如下:

1) $(P, T, F, C, W, I, M_0, \Omega)$ 为一个着色 workflow 网。

2) PT 为定义在库所集上的时间区间函数 $P \rightarrow R_0 \times R_0$, 其中, R_0 表示非负实数集。

3) $M_0: P \rightarrow N_0$ 为初始标识。

4) Ω 为一系列标识状态, $M \in \Omega$ 。

从 workflow 网 (WFN) 到 PCTP-WFN 的映射规则为: 当任务的执行时间是唯一确定值 d 时, 则 $PT(p) = T[d, d], d \geq 0$; 当任务的执行时间为变化的时间区间时, $PT(p) = T[\alpha, \beta]$ 。

1.2 时间约束

针对典型 Web 服务组合 workflow 的时间管理, 文献[23]给出了在 workflow 活动中的两种时间约束: 上限约束和下限约束。2 个活动间上限约束是一个有效常数, 并且 2 个活动间的运行时间必须小于该常数。同样的, 2 个活动间的下限约束也是一个有效常数, 并且 2 个活动间的运行时间必须大于该常数。该文献运用时间有向网络图 (Directed Network Graph, DNG) 对 workflow 进行建模。在 workflow 的建模过程中, workflow 模型一般由 TPN 来描述, 且 TPN 也常用于时序分析中^[24-26]。

在带有循环的结构中, 一些活动会被执行多次, 因此, 可以用 $Tc_k(t)$ 表示活动 t 循环 k 次的全局时间。特别情况下, $Tc_1(t)$ 也可以表示为 $Tc(t)$ 。

定义 5 活动 t_i 和活动 t_j 间的上限时间约束为: $Tc_k(t_j) - Tc_k(t_i) \leq ul$, 其中, ul 为一个有效常数。

活动 t_i 和活动 t_j 之间的下限时间约束为: $Tc_k(t_j) - Tc_k(t_i) \geq fl$, 其中, fl 为一个有效常数。

2 MCS 的建模与时间验证

2.1 MCS 工作流的执行时间

TPN 在 Petri 网原型的基础上定义一个从变迁集到某种时间因素集的映射, 这些时间因素表示活动发生所需要的时间或具备触发条件后实际发生所需要的时间^[27]。而 Petri 网原型根据时间函数 (假设为 T) 的值是否为 0, 将变迁分为非瞬间变迁和瞬间变迁。从原理上讲, 这种映射违背了变迁发生的瞬间性原则。因此, 为提高 Petri 网建模的准确性和可行性, 本文依照文献[20]所述, 在运用 Petri 网对模型进行分析时, 用一个新的子网来代替一个非瞬间变迁, 该子网包括 1 个带有时间因素的库所和 2 个瞬间

变迁, 通过对非瞬间变迁的替换得到库所含时间值的 Petri 网, 从而达到“实际系统运行过程中出现的每一种状态都可以用模拟它的网系统的一个标识来表示”这一基本要求, 最终将 CTPN 转换成库所含时间因素的着色 Petri 网 (PCTP-Net), 如图 1 所示。

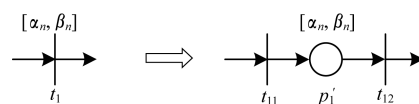


图 1 CTPN 向 PCTP-Net 转换过程示意图

2.2 基于 PCTP-WFN 的 MCS 建模

MCS 的建模问题本质上是一个扩展 workflow 的建模问题。针对 MCS 的时间验证, 本文采用 PCTP-WFN 对系统进行建模。

定义 6 MCS 中的任务分为 2 种: 关键任务和非关键任务。其中, 关键任务是为完成最终任务所必须执行的任务, 且每个 workflow 中最少要有一个关键任务。

2.3 时间验证

本文假设所有活动都具有正确性。为验证活动 t_i 至活动 t_j 间的时间约束 $Tc_k(t_j) - Tc_k(t_i) \leq b$ 是否成立, 一般情况下, 需要找出所有带活动 t_i 和活动 t_j 的 workflow, 然后运用传统的时间验证方法^[24]分别验证其是否满足时间约束。但由于 TPN 同时运行的活动较多, 导致 workflow 路径的数量呈指数倍增加。因此本文将给出一种实用性和效率都较高的方法对 workflow 的时间约束进行验证。

首先通过一个简单案例来描述 workflow 时间验证的方法。时间间隔如图 2 案例 1 中所示, 其中, 活动 t_2 由 t_{21} 、 p_2' 和 t_{22} 所组成, 活动 t_3 、 t_4 和 t_5 以此类推。假设活动 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_6 为关键任务, 如果运用传统方式^[28]验证上限约束 $Tc(t_6) - Tc(t_2) \leq 6$ 是否满足, 需要验证 4 条路径, 使得验证效率大大减小。由于 $Tc(t_6) - Tc(t_2) \leq 4$ 为上限约束, 因此只要验证 $Tc(t_6) - Tc(t_2)$ 是否满足上限约束即可。由文献[29]可知, 上限约束 $Tc(t_6) - Tc(t_2)$ 可等效为 $Tc_{\max}(t_6) - Tc_{\max}(t_2)$, 因此, 只需要运用递归法计算出 $Tc_{\max}(t_6) - Tc_{\max}(t_2)$ 的值就可以验证其是否满足时间约束: $Tc_{\max}(t_6) = \max\{Tc_{\max}(p_4'), Tc_{\max}(p_5')\} + 2 = \max\{Tc_{\max}(p_2') + 3, Tc_{\max}(p_3') + 4\} + 2 = \max\{Tc_{\max}(p_1') + 6, Tc_{\max}(p_2') + 6\} + 2 = Tc_{\max}(p_1') + 8 = 8$, $Tc_{\max}(t_2) = Tc_{\max}(p_1') + 3 = 3$, $Tc_{\max}(t_6) - Tc_{\max}(t_2) = 8 - 3 = 5 > 4$, 故不满足时间约束。

由上述内容可知,在时间约束 $Tc(t_{14}) - Tc(t_4) \leq 8$

3.2 案例验证

将图7中的所有任务分别用Petri网中的符号来表示,如图8所示。图8中每个活动运行的时间间隔已标出,由图7可知活动 $t_1, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{14}$ 为关键任务,假设活动 t_{14} 到活动 t_1 间的上限时间约束为23 min,即 $Tc(t_{14}) - Tc(t_1) \leq 23$,由定义5和定理1对以上时间约束进行运算:

1) 根据定理1和并行结构上限时间约束规则,又因为 $X = Y$,所以当 j 为奇数且 $\max\{X, Y\} = X = Y$ 时:

$$Tc(t_{14}) - Tc(t_1) = 2x_1 + 2x_2 + 4x_4 + 3x_6 + 4x_8 + 2x_{10} + 2x_{11} + x_{12} + 3x_{13} \leq 23 \quad (2)$$

2) 由于活动 t_7, t_9, t_{11}, t_{14} 为关键任务,即 $x_1 = x_4 = x_6 = x_8 = 1$,因此式(2)可化简为: $2x_2 + 4x_8 + 2x_{10} + 2x_{11} + x_{12} + 3x_{13} \leq 10$

3) 由MATLAB可得式(2)取得最大值的组合为: $[x_2, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}] = [1, 0, 1, 1, 1, 1]$

因此,在时间约束 $Tc(t_{14}) - Tc(t_1) \leq 23$ 情况下,最优路径为: $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_4 \rightarrow t_5 \rightarrow t_9 \rightarrow t_{11} \rightarrow t_{13} \rightarrow t_{14}$ 。

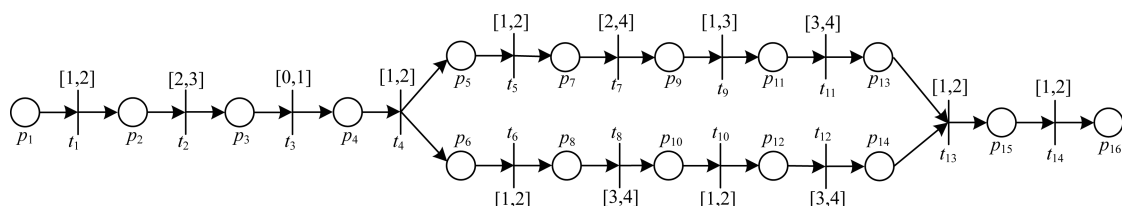


图8 案例3

以上运用军港岸基保障信息系统这一案例对本文时间约束规则进行验证,并运用MATLAB对路径组合进行不等式最大值求解,最终得出时间约束下的最优路径。

4 结束语

本文基于PCTP-WFN对工作流进行建模,首先,将工作流中的任务划分为关键任务和非关键任务,通过递推归纳得出验证时间约束的规则;然后,运用案例验证规则的正确性,同时用MATLAB对时间约束的数学模型进行运算分析,从而得出工作流中的最佳路径;最后,对军港岸基保障信息系统案例进行分析,结果表明该方法具有一定的实用性和可行性。下一步将在以下方面展开研究:将关键任务进行更细致地划分,使得时间验证更精确;对时间约束下最优路径的推理方法进行改进,使得该方法具有通用性和完备性;对任务关键系统的资源验证方法进行研究。

参考文献

- [1] 王涛. 任务关键系统的软件行为建模与检测技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
- [2] 李琳, 赵国生. 基于Agent的可生存系统认知单元结构模型[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2013, 29(6): 25-28.
- [3] HINZ S, SCHMIDT K, STAHL C. Transforming BPEL to Petri nets[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Business Process Management. Berlin, Germany: Springer, 2005: 220-235.
- [4] MONAKOVA G, KOPP O, LEYMAN F. Improving control flow verification in a business process using an extended Petri net[EB/OL]. [2017-03-25]. <http://www.ceur-ws.org/Vol-438/paper15.pdf>.
- [5] FERRARA A. Web services: a process algebra

approach[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Service Oriented Computing. New York, USA: ACM Press, 2004: 242-251.

- [6] FOSTER H, UCHITEL S, MAGEE J, et al. Model-based verification of Web service compositions[C]//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Automated Software Engineering. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2003: 152-161.
- [7] BREUGEL F V, KOSHKINA M, BREUGEL F V, et al. Models and verification of BPEL[EB/OL]. [2017-03-26]. <http://www.cse.yorku.ca/~franck/research/drafts/tutorial.pdf>.
- [8] MARJANOVIC O. Dynamic verification of temporal constraints in production workflows[C]//Proceedings of the Australasian Database Conference. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2000: 341-342.
- [9] BETTINI B C, WANG X S, JAJODIA S. Temporal reasoning in workflow systems[J]. Distributed and Parallel Databases, 2002, 11(3): 269-306.
- [10] AALST W M, HOFSTEDE A H. Verification of workflow task structures: a Petri-net-based approach[J]. Information Systems, 2000, 25(1): 43-69.
- [11] AALST W M. Process-aware information systems: lessons to be learned from process mining[C]//Proceedings of Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. Berlin, Germany: Springer, 2009: 1-26.
- [12] 李丹, 陈启璋, 刘强. 一种基于Petri网的时间工作流模型的研究与验证[J]. 计算机工程, 2007, 33(7): 78-80.
- [13] 罗智勇, 汪鹏, 尤波, 等. 逆向归约时间约束工作流准确率优化调度[J]. 北京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 99-104.
- [14] LI Huifang, FAN Yushun. Workflow model analysis based on time constraint Petri nets[J]. Journal of Software, 2004, 15(1): 17-26.

(下转第77页)

- [2] LI W, ZHANG W. Coverage hole and boundary nodes detection in wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 48: 35-43.
- [3] SAHOO P K, LIAO W. HORA: a distributed coverage hole repair algorithm for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(7): 1397-1410.
- [4] TAO D, TANG S, LIU L. A coverage enhancement algorithm based on constrained artificial fish-swarm in directional sensor networks [J]. Journal of Internet Technology, 2014, 15(1): 43-52.
- [5] ZHANG K, DUAN C, JIA H. Genetic simulated annealing-based coverage-enhancing algorithm for multimedia directional sensor networks [J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 28(9): 1598-1609.
- [6] SUNG T, YANG C. Voronoi-based coverage improvement approach for wireless directional sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 39: 202-213.
- [7] TAO D, WL T. A survey on barrier coverage problem in directional sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 876-885.
- [8] MUNISHWAR V P, ABU-GHAZALEH N B. Coverage algorithms for visual sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, 9(4): 1-36.
- [9] WANG H, ROMAN H E, YUAN L, et al. Connectivity, coverage and power consumption in large-scale wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2014, 75: 212-225.
- [10] SONG Y, WANG B, SHI Z, et al. Distributed algorithms for energy-efficient even self-deployment in mobile sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(5): 1035-1047.
- [11] 朱继华, 武俊, 陶洋. 基于覆盖率的传感器优化部署算法 [J]. 计算机工程, 2010, 36(3): 94-96.
- [12] KIM K. Mountainous terrain coverage in mobile sensor networks [J]. IET Communications, 2015, 9(5): 613-620.
- [13] LIU L, MA H. On coverage of wireless sensor networks for rolling terrains [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(1): 118-125.
- [14] NAZARZEHI V, SAVKIN A V, BARANZADEH A. Distributed 3D dynamic search coverage for mobile wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(4): 633-636.
- [15] ALAM S M N, HAAS Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 34(C): 157-169.
- [16] 钟永信, 黄建国, 韩晶. 三维传感器网络部署、覆盖和连接问题研究 [J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1447-1451.

编辑 金胡考

(上接第65页)

- [15] 谭冠政, 肖如健. 基于 Petri 网的工作流时间动态预测及验证 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(12): 1801-1803.
- [16] MERLIN P M. A study of the recoverability of computing systems [D]. Berkeley, USA: University of California, 1974.
- [17] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [18] JUAN E Y T, TSAI J J P, MURATA T, et al. Reduction methods for real-time systems using delay time Petri nets [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2001, 27(5): 422-448.
- [19] PEDRYCZ W, CAMARGO H. Fuzzy timed Petri nets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 140(2): 301-330.
- [20] 陈 琨, 韩燕波. 基于 Petri 网的 Web 服务组合时间验证分析 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(20): 4938-4942.
- [21] TANG X F. A Petri net-based semantic Web service automatic composition method [J]. Journal of Software, 2007, 18(12): 2991-3000.
- [22] 朱连章, 张乐伟, 刘璐璐. 基于赋时分层着色 Petri 网的以太网系统建模 [J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(11): 5-8.
- [23] EDER J, PANAGOS E, POZEWAUNIG H, et al. Time management in workflow systems [M]. Berlin, Germany: Springer, 2001: 265-280.
- [24] YANG Q, CHUANG L, WANG J Y. Linear temporal inference of workflow management systems based on timed Petri nets models [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Engineering and Deployment of Cooperative Information Systems. Berlin, Germany: Springer, 2002: 30-44.
- [25] TANG D, LIU D N. Method of reachability analysis in HTPN based workflow model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(4): 487-493.
- [26] SALIMIFARD K, WRIGHT M. Petri net-based modelling of workflow systems: an overview [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 134(3): 664-676.
- [27] 郭智奇. Petri 网在井下机车调度中的建模与仿真 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [28] CHEN J, YANG Y. Temporal dependency based checkpoint selection for dynamic verification of fixed-time constraints in grid workflow systems [C]//Proceedings of International Conference on Software Engineering. New York, USA: ACM Press, 2008: 141-150.
- [29] TSAI J J P, YANG S J, CHANG Y H. Timing constraint Petri nets and their application to schedulability analysis of real-time system specifications [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1995, 21(1): 32-49.
- [30] 杨启亮, 李决龙, 邢建春, 等. 需求自感知的军港岸基保障物联网系统 [J]. 国防科技, 2014, 35(2): 56-62.

编辑 吴云芳