

一种基于 TF-HBPN 的复杂系统行为分析方法

陈倩¹ 余维² 叶阳东¹

(郑州大学信息工程学院 郑州 450052)¹ (郑州大学软件技术学院 郑州 450052)²

摘要 针对大规模复杂系统建模分析时的状态爆炸问题,提出一种扩展了时间因素的分层贝叶斯 Petri 网模型(Hierarchical Bayesian Petri Net With Time Factor, TF-HBPN),并基于该模型提出一种递归构建方法和递归溯因行为分析方法。该方法首先对观测到的系统行为构造顶层 TF-HBPN 模型,进而通过分层递归方法将复杂系统并发行为分析问题分解,并通过递归溯因推理和时序分析来计算非观测系统行为及其事件链的发生概率,最后将分析结果与正常动作事件链进行对比,分离出干扰信息。实例分析表明,该方法可对大规模复杂系统行为进行快速建模分析,当观测数据存在干扰和缺失时仍能进行系统行为的分析和现象的溯因,分析结果的可信度较高。与其他基于 Petri 网的复杂系统分析方法相比,该方法建模难度更低,模型表达更为简洁也更易理解。

关键词 复杂系统,分层时间 Petri 网,行为分析,递归,溯因推理

中图分类号 TP301.2 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.7.014

Method of Behavior Analysis for Complex System Based on Hierarchical Bayesian Petri Net with Time Factor

CHEN Qian¹ SHE Wei² YE Yang-dong¹

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)¹

(School of Software Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)²

Abstract For the problem that the status is prone to explosive growth when we try to model and analyse a complex system with huge scale, this paper proposed an Bayesian hierarchical Petri net model with the extending time factor (TF-HBPN), and based on this model proposed a recursive construction method and recursive abductive behavior analysis method. Firstly, our method creates top-level TF-HBPN according to the observed system's behavior and decomposes behavior analysis problem of complex systems through hierarchical recursion. Then it calculates the fault probability of the correct time sequence chain of fault events by recursive abductive reasoning. Finally, it calculates the bayesian probability of the event chain of system's behavior obtained by recursive abductive reasoning and time series analysis. The analysis results are compared with the right event chain to separate interference information. The experimental cases show that this method can model and analyze complex fault quickly and still can do system's behavior analysis and abductive reasoning with alarm missing. Compared with the general Petri nets, this method has a lower degree of modeling difficulty and is more concise and simple.

Keywords Complex system, Time hierarchical Bayesian Petri net, Behavior analysis, Recursion, Abductive reasoning

1 引言

近年来,随着工业技术的不断发展,各类系统日趋复杂。对于复杂系统的建模和分析过程而言,其描述模型的内部节点数量往往较大,且随着系统的进一步复杂化,节点数及其状态组合数的增长将呈现指数型变化,造成组合爆炸。如何有效减少模型节点数量、降低系统模型规模,对于复杂系统的行为建模和分析具有重要意义。

Petri 网因具有良好的描述与分析离散事件动态系统行为的特性,被广泛地应用于各领域的复杂系统建模与行为分析中。文献[1]利用模糊 Petri 网表示模糊产生式规则,通过

矩阵的迭代运算进行电力系统的状态分析;文献[2]结合贝叶斯方法和 Petri 网建模,在推理过程中引入先验概率,从而一定程度上避免了参数设定的主观性,同时保证了模型的容错性和适应性;文献[3]将经验知识和实时监测数据相结合,采用一种赋时 Petri 网对物料自动输送系统进行故障诊断,用检测变迁时间统计量的差异对离散事件系统进行分析,以快速定位故障;文献[4]改进了模糊 Petri 网的故障诊断方法,结合关联矩阵约简技术,降低了故障诊断的计算量;文献[5]基于有色 Petri 网来进行电力系统的故障诊断,有效缩减了系统建模的规模。但是,当系统规模更为庞大或多个内部节点间存在更为复杂的并发交互行为时,基于以上方法的系统分析模

到稿日期:2014-07-05 返修日期:2014-10-02 本文受国家自然科学基金项目(61170223, U1204610),河南省重点科技攻关计划项目(132102210404)资助。

陈倩(1990-),女,硕士生,主要研究方向为 Petri 网理论、复杂系统建模, E-mail: 903844195@qq.com;余维(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论、复杂系统建模;叶阳东(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为机器学习、智能系统。

型均会遭遇状态库增加和分析结果集的扩大。

本文在文献[2,6-8]的基础上提出一种扩展了时间因素的分层贝叶斯 Petri 网。在不假定知识集完备的情况下,运用 TF-HBPN 建模方法引入时间因素来递归地构建分层模型并分析其系统行为,将复杂系统的行为分析问题层层分解,从而转化为简单的因果问题,通过时间递归溯因推理获得事件因果链并进行贝叶斯概率计算,同时排除干扰信息,从观察现象对系统真实行为进行回溯。与其他基于 Petri 网的复杂系统分析方法相比,本文方法建模难度更低、更简洁也更易理解。

2 扩展时间因素的分层贝叶斯 Petri 网

2.1 贝叶斯概率推理^[2]

贝叶斯网络^[9] $B(G, P)$: G 为一个具有 n 个节点的有向无环图, P 为一个与每个节点相关的条件概率表。 G 的节点集代表论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的变量, 其联合概率分布为^[9]:

$$p(U) = p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i | \text{parents}(x_i)) \quad (1)$$

对于具有 m 个基本事件 $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 的随机变量 x_i , 已知 $V = \{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\}$ 为观察结果, 可得其条件概率为^[9]:

$$p(x_i = x_{ij} | V) = \frac{p(x_i = x_{ij}, V)}{\sum_{k=1}^m p(x_i = x_{ik}, V)} \quad (2)$$

运用贝叶斯网络的逆向推理, 由式(1)、式(2)可计算 $x_i = x_{ij}$ 的后验概率^[9]:

$$p(x_i = x_{ij} | x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) = \frac{p(x_i = x_{ij}) \prod_{a \neq i} p(x_a | \text{parents}(x_a))}{\sum_{k=1}^m [p(x_i = x_{ik}) \prod_{a \neq i} p(x_a | \text{parents}(x_a))]} \quad (3)$$

若式(3)中 x_a 节点的父节点集 $\text{parents}(x_a) = \emptyset$, 则 $p(x_a | \text{parents}(x_a)) = p(x_a)$ 。

2.2 扩展了时间因素的分层贝叶斯 Petri 网的定义

在文献[2,6-8]的基础上定义扩展时间因素的分层贝叶斯 Petri 网(TF-HBPN)。

定义 1(扩展时间因素的分层贝叶斯 Petri 网, TF-HBPN) 令 TF-HBPN 为一个十元组 $\Sigma_{TF-HBPN} = \{L, S, T, F, U, PR, B, \tau, \theta, M_0\}$, 其中:

- 1) L 表示该层子网所在层号;
 - 2) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为库所的有限集;
 - 3) $T = \{T_N, T_B\}$ 为变迁的有限集;
 - 4) $F \subset (S \times T) \cup (T \times S)$ 为弧的有限集;
 - 5) $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为有限变量集, 变量 x_i 的取值为 $\{0, 1\}$;
 - 6) $PR: U \rightarrow [0, 1]$, $PR(x_i)$ 为 x_i 的先验概率;
 - 7) $B: T_B \rightarrow [0, 1]^j$, $B(t_{Bi})$ 为 t_{Bi} 在 $\cdot t_{Bi}$ 条件下的概率分布向量, $t_{Bi} \in T_B$, $\cdot t_{Bi}$ 为 t_{Bi} 的前置库所集, t_{Bi} 为 t_{Bi} 的后置库所集 $\{s_1, s_2, \dots, s_j\}$ 。
- $$B(t_{Bi}) = [b(s_1), b(s_2), \dots, b(s_j)] \quad (4)$$
- 其中, $b(s_i) = p(s_i | \cdot t_{Bi})$, $i = 1, 2, \dots, j$ 。
- 8) $\tau: E \rightarrow R_0 \times (R_0 \cup \{\infty\})$, $\tau(e)$ 为事件 e 发生过程中, 可能经历的时间延迟(以时间区间表示);
 - 9) $\theta: T \rightarrow \{0, 1\}$, $\theta(t)$ 为变迁 t 的点火许可函数;

10) M_0 为 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 初始标识。

在文献[10,11]的基础上, 提出了 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 的映射规则。

定义 2($\Sigma_{TF-HBPN}$ 映射规则与分层扩展) 令 $\forall x \in S \cup T$, 以 $\cdot x = \cdot x \cup x$ 表示 x 的外延, $F_x = \{(x, y) \in F\} \cup \{(y, x) \in F\}$ 表示 x 的关联弧集, 在 $\Sigma_{TF-HBPN} = \{L, S, T, F, U, PR, B, \tau, \theta, M_0\}$ 中定义如下映射关系。

1) 对于 $\forall s \in S$, 库所映射 f_s 定义为:

$$f_s(s, F_s) = (L_1, S_1, T_1, F_1, U_1, PR_1, B_1, \tau_1, \theta_1, M_{01})$$

其中, $L_1 = L + 1$ 。则 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 基于 f_s 的分层扩展定义为:

$$\Sigma_{ex} = (L_1, S_1, T_1 \cup \cdot s', F_1, U_1, PR_1, B_1, \tau_1, \theta_1, M_{01})$$

2) 对于 $\forall t \in T$, 变迁映射 f_T 定义为:

$$f_T(t, F_t) = (L_1, S_1, T_1, F_1, U_1, PR_1, B_1, \tau_1, \theta_1, M_{01})$$

其中, $L_1 = L + 1$ 。则 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 基于 f_s 的分层扩展定义为:

$$\Sigma_{ex} = (L_1, S_1 \cup \cdot t', T_1, F_1, U_1, PR_1, B_1, \tau_1, \theta_1, M_{01})$$

3) 对于两个十元组

$$\Sigma_1 = (L_1, S_1, T_1, F_1, U_1, PR_1, B_1, \tau_1, \theta_1, M_{01})$$

$$\Sigma_2 = (L_2, S_2, T_2, F_2, U_2, PR_2, B_2, \tau_2, \theta_2, M_{02})$$

若 $L_1 = L_2 = L$, 可定义 Σ_1, Σ_2 与 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 的或关系映射 f_{OR} 为: $f_{OR}(s, F_s) = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$, 其中 $\forall s \in S$ 。则 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 基于 f_{OR} 的分层扩展定义为:

$$f_{OR}(s, F_s) = (L_1, S_1 \cup S_2, T_1 \cup T_2 \cup \cdot s', F_1 \cup F_2, U_1 \cup U_2, PR_1 \cup PR_2, B_1 \cup B_2, \tau_1 \cup \tau_2, \theta_1 \cup \theta_2, M_{01} \cup M_{02})$$

4) 对于两个十元组

$$\Sigma_1 = (L_1, S_1, T_1, F_1, U_1, PR_1, B_1, \tau_1, \theta_1, M_{01})$$

$$\Sigma_2 = (L_2, S_2, T_2, F_2, U_2, PR_2, B_2, \tau_2, \theta_2, M_{02})$$

若 $L_1 = L_2 = L$, 可定义 Σ_1, Σ_2 与 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 的与关系映射 f_{AND} 为: $f_{AND}(t, F_t) = \Sigma_1 \cap \Sigma_2$, 其中 $\forall t \in T$ 。则 $\Sigma_{TF-HBPN}$ 基于 f_{AND} 的分层扩展定义为:

$$f_{AND}(t, F_t) = (L_1, S_1 \cup S_2 \cup \cdot t', T_1 \cup T_2, F_1 \cup F_2, U_1 \cup U_2, PR_1 \cup PR_2, B_1 \cup B_2, \tau_1 \cup \tau_2, \theta_1 \cup \theta_2, M_{01} \cup M_{02})$$

定义 3(令牌和状态标识集^[2]) 以 $\pi(s) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$

表示 TF-HBPN 库所 s 中令牌的有限集。令牌 λ_i 用向量 $(rv, tm, \{st\})$ 表示, 其中, $rv \in \{-1, 0, 1\}$ 以 1 表示实令牌, 以 0 表示虚令牌, 以 -1 表示冲突令牌; $tm \in R_0 \times R_0$ 表示令牌可能出现的时间区间, $\{st\}$ 为令牌流经的库所 s 所对应的状态集, 一个状态 $st \in S \times \{0, 1\}$, st_i 的值为库所 s 中是否含有实令牌, 若含有则值为 1, 否则值为 0。

用状态标识 M_i 对 TF-HBPN 的动态行为进行描述, TF-HBPN 的每一个状态对应于库所的一个标识向量。采用集合 $\{(s, \pi(s))\}$ 表示 M_i , 所有系统状态的集合记为 M 。若 M_j 通过变迁 t 的发生直接可达 M_k , 则记为 $M_j [t > M_k$ 。

定义 4(最迟触发时间区间) 设 $TM = \{tm_1, tm_2, \dots, tm_n\}$, 其中任意 $tm_i = [a_i, b_i]$, 令 $A = \{a\}$ 为 TM 中所有元素左端点的集合, 最迟触发时间区间定义为

$$LI(TM) = \{tm_k | a_k = \max(A)\} \quad (5)$$

在求 $\max(A)$ 时, 若 a_i 为空, 忽略 a_i 。 $LI(TM)$ 中时间间隔最长的记为 $LI_{Max}(TM)$ 。

定义 5(时序一致性判定函数) 设时间区间 $tm_i = [a, b]$, $tm_j = [c, d]$, 某两个有时间约束的事件为 e_i, e_j , 有 $e_i \xrightarrow{tm_{ij}} e_j$, 表示 e_i 经时间区间 tm_{ij} 后引发 e_j , 定义 tm_i, tm_j 的时序一致性判定函数为

$$\kappa(tm_i, tm_j, tm_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{if } (tm_i \otimes tm_{ij}) \odot tm_j \in \{\gamma, \delta\} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中, \otimes 为文献[12]中的时间区间关系判定函数, \odot 为时间区间关系判定运算:

$$tm_i \odot tm_j = \begin{cases} \phi, & \text{if } a < c \wedge b < c \& a > c \wedge a > d \\ \delta, & \text{if } a < c \wedge b > d \& a > c \wedge d > b \\ \gamma, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

定义 6(TF-HBPN 中令牌的融合计算方法) 以 $s_{pre} \in \bar{s}$ 表示 s 的最近前置库所集中的某个元素, 其中 \bar{s} 为 s 的最近前置库所集, 即 s 的前置变迁 $\cdot s$ 的所有前置库所。用 $\Omega_s \subseteq \{\pi(s_{pre})\}$ 表示 s 的最近前置库所集中的非冲突令牌子集(包含实令牌与虚令牌, 但不包含冲突令牌)。设状态标识 M_i 下, $\lambda_i \in \pi(s)$,

1) 若 $\pi(s) \neq \emptyset \wedge \Omega_s \neq \emptyset$, 且 $\forall \lambda_j \in \Omega_s: \kappa(\lambda_i^m, \lambda_j^m, \tau_{Max}(TE(t, s))) = 1$, 则 λ_i 可以融合 Ω_s , 记为 $\lambda_i \triangleleft \Omega_s$ 。其中, $\tau_{Max}(TE(t, s))$ 为 s 前置变迁所关联的时间区间最大值, λ_i^m 为令牌 λ_i 的 tm 分量。融合后的令牌 λ_i' 的计算方法 ζ 为

$$\zeta(\lambda_i, \Omega_s) = (0, LI_{Max}(\Omega_s) \oplus \tau_{Max}(TE(t, s)), \{\{st_{\tau}\} \cup \{st_{\Omega_s}\}\})$$

其中, $\{st_{\tau}\}$ 为 \bar{s} 的状态, $\{st_{\Omega_s}\}$ 表示 Ω_s 中所有令牌的 st 分量的并集, 新产生的 λ_i' 为虚令牌;

2) 若 $\pi(s) \neq \emptyset \wedge \Omega_s \neq \emptyset$, 且 $\forall \lambda_j \in \Omega_s: \kappa(\lambda_i^m, \lambda_j^m, \tau_{Max}(TE(t, s))) = 0$, 则 λ_i 与 Ω_s 冲突, 记为 $\lambda_i \infty \Omega_s$ 。产生的令牌 λ_i' 的计算方法 χ 为

$$\chi(\lambda_i, \Omega_s) = (-1, tm_{\lambda_i} \oplus \tau_{Max}(t, s), \{\{st_{\tau}\} \cup \{st_{\Omega_s}\}\})$$

新产生的 λ_i' 为冲突令牌;

3) 若 $\pi(s) = \emptyset \wedge \Omega_s \neq \emptyset \wedge tm_{\Omega_s} \neq \emptyset$, 则 λ_i 为空元素, λ_i 可接受 Ω_s , 记为 $\lambda_i \triangleleft \Omega_s$ 。接受后的令牌 λ_i' 的计算方法 ψ 为

$$\psi(\lambda_i, \Omega_s) = (rm, LI_{Max}(\Omega_s) \oplus \tau_{Max}(t, s), \{\{st_{\tau}\} \cup \{st_{\Omega_s}\}\})$$

设 $LI_{Max}(\Omega_s) \oplus \tau_{Max}(t, s)$ 产生的区间为 $tm' = [a, b]$, 若 $a < 0 \vee b < 0$, 则 λ_i' 为冲突令牌, $rm = -1$; 否则, 新产生的 λ_i' 为虚令牌, $rm = 0$ 。

定义 7($\Sigma_{TF-HBPN}$ 的运行规则^[2]) 在 M_i 状态下,

1) 若 $\exists t \in T: \theta(t) = 0, \forall s_i \in \cdot t, \forall s_j \in \cdot t: \exists \lambda_k \in \pi(s_i), \exists \lambda_l \in \pi(s_j) \rightarrow \kappa(\lambda_k^m, \lambda_l^m, \tau(TE(t))) = 1$, 则变迁 t 有发生权, 记为 $M_i[t]$;

2) 若 $\exists t \in T: \theta(t) = 0, \forall s_i \in \cdot t, \forall s_j \in \cdot t: \exists \pi(s_i) \neq \emptyset \wedge \pi(s_j) = \emptyset$, 则变迁 t 有发生权, 记为 $M_i[t]$;

3) 变迁 $t \in T$ 的发生产生新的标识 M_{i+1} , 记为 $M_i[t] M_{i+1}$, 同时, $\theta(t)$ 置为 1。

$$M_{i+1}(s) = \begin{cases} M_i(s) + \zeta(\lambda_j, \Omega_s), & \exists \lambda_j \in \pi(s): \lambda_j \triangleleft \Omega_s \\ M_i(s) + \psi(\lambda_j, \Omega_s), & \exists \lambda_j \in \pi(s): \lambda_j \triangleleft \Omega_s \\ M_i(s) + \chi(\lambda_j, \Omega_s), & \exists \lambda_j \in \pi(s): \lambda_j \infty \Omega_s \\ M_i(s), & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

3 基于 TF-HBPN 的递归分层建模及溯因推理

3.1 递归分层建模算法

当模型的节点个数过多时, 易出现组合爆炸的问题, TF-

HBPN 采取递归构建分层模型的方法, 根据故障事件链逆向建立顶层 TF-HBPN, 通过映射规则对 TF-HBPN 进行逐层映射, 将复杂系统的故障诊断问题分层, 从而将问题转化为简单因果推理的集合。下文提出了一种递归构建 TF-HBPN 模型算法。

算法 1 $\Sigma_{TF-HBPN}' = \text{GetNext}(\Sigma_{TF-HBPN})$

输入: $\Sigma_{TF-HBPN}$

输出: $\Sigma_{TF-HBPN}'$

算法步骤:

1. for each $s \in S \wedge \cdot s = \emptyset$
 ▷ 源库所(即无输入弧的库所)
2. if 存在映射
3. switch(映射类型)
4. case 库所映射:
 执行规则 f_S ;
5. case 变迁映射:
 执行规则 f_T ;
6. case 或关系映射:
 执行规则 f_{OR} ;
7. case 与关系映射:
 执行规则 f_{AND} ;
8. $L = L_1$
9. end switch
10. return $\Sigma_{TF-HBPN}'$
11. $\Sigma_{TF-HBPN} = \Sigma_{TF-HBPN}'$
12. $\Sigma_{TF-HBPN}' = \text{GetNext}(\Sigma_{TF-HBPN})$
13. else
14. break; ▷ 终止建模
15. end for

3.2 递归溯因推理

根据系统行为的时序特征和因果关系, 提出一种基于 TF-HBPN 的系统行为递归溯因推理方法。

1) 针对观测到的系统行为, 根据文献[13]的方法推理出在此之前可能发生的系统行为, 并根据事件链逆向建立顶层 TF-HBPN。

2) 依据映射规则对顶层 TF-HBPN 进行映射, 逐层逆向构建下一层的 TF-HBPN, 直至最底层(详见算法 1)。

3) 将观测到的系统行为映射为令牌, 当一个库所没有与之对应的元件时, 将该库所设置为虚库所, 虚库所和其后置变迁不参与到溯因推理的计算当中。

4) TF-HBPN 根据定义 7 中的运行规则递归地进行溯因推理, 当所有令牌的值不再发生变化时, 停止计算。

5) 获取汇入库所(无输出弧的库所)的令牌集, 若剩余令牌数量为 1 且为非冲突令牌, 直接对其 tm 分量按式(3)计算故障的发生概率; 若剩余令牌数量大于 1, 且不存在冲突令牌, 则对每个令牌的 tm 分量按式(3)计算故障的发生概率并求算术平均(当某令牌发生概率值为 ϵ 时, 该令牌不参与概率计算)。基于委员会策略, 若计算结果大于 0.5, 则认为该库所代表的元件发生了故障。

6) 对确认的元件故障结合 TF-HBPN 进行分析, 与正常动作的事件链进行对比, 以此发现信息缺失、事件误报等情况。

具体推理和计算过程在算例分析中说明。

4 算例与分析

为了直观地说明问题,本文以图1中220kV电力系统中的元件故障及告警诊断过程为例进行系统行为的时序分析。

4.1 单一故障行为分析

监控中心收到如下信息,L2Sm(52ms)、T3s(544ms)、T4s(545 ms)、L5Rs(546ms)动作,断路器CB8(87ms)、CB13(520ms)、CB16(564ms)、CB17(565ms)、CB32(550 ms)断开。

首先,根据文献[13]的方法,确定图1中的可疑元件集{B3,L2,L5},并分别对其故障蔓延过程逆向建立顶层TF-HBPN,按照电力系统的保护规则,即当主保护未动作时,近后备保护动作切除故障;当相邻元件如B3发生故障但主保护和近后备保护均未动作时,远后备保护L1Ss才发生,所以它是相邻元件故障下的保护动作,作为远后备保护切除故障。如图2(a1)、图2(a2)及图2(b1)所示,假设图1中的母线B3发生故障,逆向推导出主保护B3m动作或B3的远后备保护动作均可表示母线B3发生故障,断路器CB14、CB15、CB13、CB12、CB19的跳闸将触发B1m动作。电力系统中元件发生故障后,将引发相应的继电保护装置动作和断路器的跳闸的实际动作,对顶层TF-HBPN进行相应的逐层映射,由映射规则可知,图2(a2)仍为顶层模型,图2(b1)、图2(b2)均为第二层模型,图2(c)为第三层模型。图2、图3分别为假定母线B3、线路L2发生故障时保护动作与断路器跳闸的分层时间Petri网故障诊断模型。

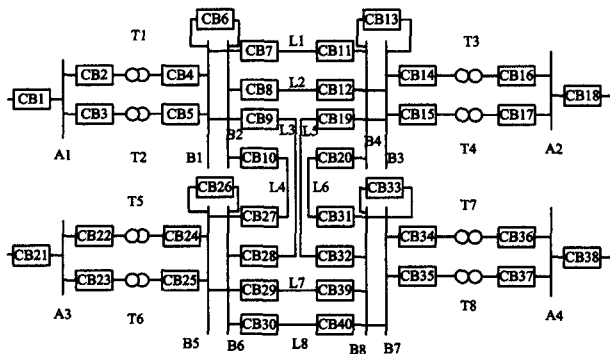


图1 220kV电力系统示意图

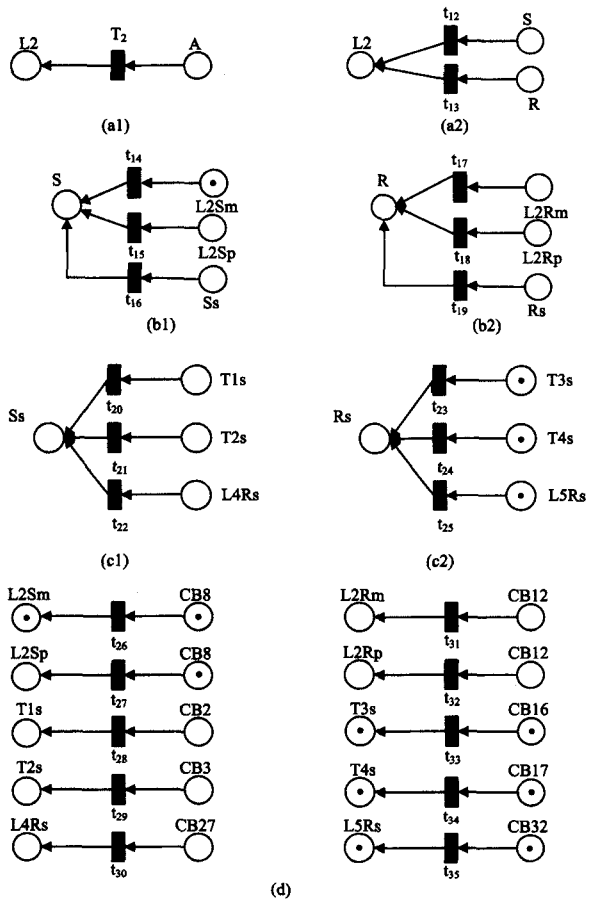


图3 L2的TF-HBPN层次模型

图2、图3中的库所以其代表的装置命名,B3表示母线B3故障,L2含义与之类似;B3m表示B3主保护动作,T1s、T2s、T3s、T4s、L5Rs、L4Rs、L2Ss、L2Rm、L2Rp、L2Sm、L2Sp的含义与之类似;CB8表示断路器CB8跳闸,CB2、CB3、CB12、CB13、CB14、CB15、CB16、CB17、CB19、CB27、CB32相应断路器的含义与之类似;A、Ls、S、R、Ss、Rs均为虚库所,表示其前驱库所的集合。

根据文献[6]可知,主保护时延、近后备保护时延时间区间均为[10,40];远后备保护时延,时间区间均为[510,540];断路器跳开时延,时间区间均为[20,40]。变迁均代表其后置库所的时延时间区间的 τ 函数值,以MNM方法进行计算;将观测信息作为令牌置入。

L5的TF-HBPN层次模型与L2的TF-HBPN层次模型结构相似。

构造的TF-HBPN中,库所的PR函数值根据文献[2]中的元件故障先验概率及继电保护装置的拒动、误动概率确定,如表1、表2所列。

表1 元件故障的先验概率表

元件	线路/百公里	母线/条	变压器/台
故障概率	0.1629	0.0058	0.0039

表2 继电保护装置的拒动、误动概率表

故障概率	线路主保护/台	母线主保护/台	变压器主保护/台	断路器/台
误动%	0.23	0.06	0.14	0.48
拒动%	0.07	3.08	0.62	0.83

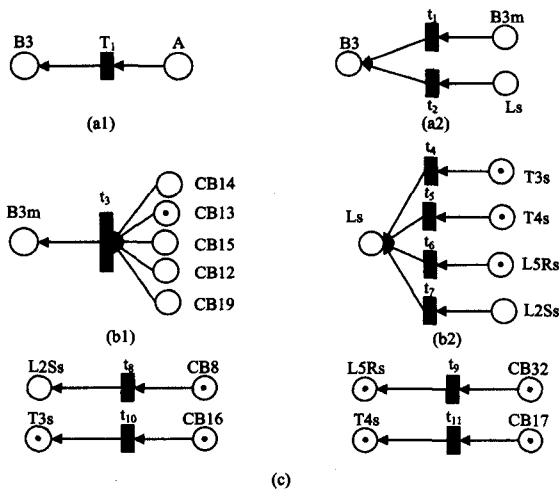


图2 B3的TF-HBPN层次模型

4.1.1 故障信息的时间递归溯因推理

对母线 B3 的 TF-HBPN 分别进行递归溯因推理,为了简化说明,除初始状态 M_0 外,仅对点火变迁触发后产生或改变的令牌进行描述,未发生变化的令牌用“...”表示。母线 B3 的初始状态标示为:

$$M_0 = \{ \langle L2Sm, \{ (1, [52, 52], \{ \}) \} \rangle, \langle CB8, \{ (1, [87, 87], \{ \}) \} \rangle, \langle CB13, \{ (1, [520, 520], \{ \}) \} \rangle, \langle CB16, \{ (1, [564, 564], \{ \}) \} \rangle, \langle CB17, \{ (1, [565, 565], \{ \}) \} \rangle, \langle CB32, \{ (1, [566, 566], \{ \}) \} \rangle, \langle T3s, \{ (1, [544, 544], \{ \}) \} \rangle, \langle T4s, \{ (1, [545, 545], \{ \}) \} \rangle, \langle L5Rs, \{ (1, [546, 546], \{ \}) \} \rangle \}$$

对于模型最底层中的源库所,基于定义 7 可得出发生变迁 t_5 ,此时在 M_0 的基础之上生成新的状态标示为:

$$M_1 = \{ \dots, \langle L5Rs, \{ (1, [546, 546], \{ CB32=1 \}) \} \rangle \};$$

在 M_1 的基础上于 c 层进行回溯推理到 $b2$ 层,触发变迁 t_6 ,由于变迁 t_6 的直接后继库所为虚库所 Ls ,则递归推理直至最顶层,生成新的状态标示为:

$$M_2 = \{ \dots, \langle B3, \{ (0, [6, 36], \{ L5Rs=1, CB32=1 \}) \} \rangle \}$$

同理可得其余源库所的递归溯因推理:

$$M_3 = \{ \dots, \langle T3s, \{ (1, [544, 544], \{ CB16=1 \}) \} \rangle \}$$

$$M_4 = \{ \dots, \langle B3, \{ (0, [6, 36], \{ L5Rs=1, CB32=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [4, 34], \{ T3s=1, CB16=1 \} \rangle \}$$

$$M_5 = \{ \dots, \langle T4s, \{ (1, [545, 545], \{ CB17=1 \}) \} \rangle \}$$

$$M_6 = \{ \dots, \langle B3, \{ (0, [6, 36], \{ L5Rs=1, CB32=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [4, 34], \{ T3s=1, CB16=1 \} \rangle, \langle 0, [5, 35], \{ T4s=1, CB17=1 \} \rangle \}$$

$$M_7 = \{ \dots, \langle L2Ss, \{ (0, [47, 67], \{ CB8=1 \}) \} \rangle \}$$

$$M_8 = \{ \dots, \langle B3, \{ (0, [6, 36], \{ L5Rs=1, CB32=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [4, 34], \{ T3s=1, CB16=1 \} \rangle, \langle 0, [5, 35], \{ T4s=1, CB17=1 \} \rangle, \langle -1, [47, 67], \{ T4s=1, CB17=1 \} \rangle \}$$

B3 汇入库所最终状态为:

$$M_9 = \{ \dots, \langle B3, \{ (0, [6, 36], \{ L5Rs=1, CB32=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [4, 34], \{ T3s=1, CB16=1 \} \rangle, \langle 0, [5, 35], \{ T4s=1, CB17=1 \} \rangle, \langle -1, [-493, -443], \{ L2Ss=0, CB8=1 \} \rangle \}$$

同理可得 L2、L5 的递归溯因推理。

L2 汇入库所最终状态为:

$$M_{10} = \{ \dots, \langle L2, \{ (0, [6, 36], \{ L5Rs=1, CB32=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [4, 34], \{ T3s=1, CB16=1 \} \rangle, \langle 0, [5, 35], \{ T4s=1, CB17=1 \} \rangle, \langle 0, [12, 42], \{ L2Sm=1, CB8=1 \} \rangle, \langle 0, [7, 57], \{ L2Sp=0, CB8=1 \} \rangle \}$$

L5 汇入库所最终状态为:

$$M_{10} = \{ \dots, \langle L5, \{ (0, [4, 34], \{ T3s=1, CB16=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [5, 35], \{ T4s=1, CB17=1 \} \rangle, \langle -1, [-493, -443], \{ L2Ss=0, CB8=1 \} \rangle, \langle -1, [486, 536], \{ L5Rm=0, CB32=1 \} \rangle, \langle -1, [486, 536], \{ L5Rp=0, CB32=1 \} \rangle \}$$

4.1.2 概率计算及故障假说的时序一致性判定

在各元件故障的汇入库所状态中,代表母线 B3 故障的汇入库所内有 4 个令牌,但这 4 个令牌中存在冲突令牌。这表明,根据算例 1 中的故障信息,以 B3 故障为假设进行的推理存在时间上的不一致性,因此 B3 故障假设不成立。同理可得 L5 故障假设不成立。

代表 L2 故障的汇入库所内有 5 个令牌,且没有冲突令牌。基于汇入库所中时序的事件链,可以对其进行贝叶斯因果推理来求得故障发生的概率。

根据事件的因果关系和表 1、表 2 中的先验概率,以式

(3) 计算 L2 的故障概率:

$$P(L2=1 | L2Sm=1, CB8=1) = 0.9883$$

$$P(L2=1 | T3s=1, CB16=1) = 0.9929$$

$$P(L2=1 | T4s=1, CB17=1) = 0.9929$$

$$P(L2=1 | L2Sp=0, CB8=1) = \epsilon$$

$$P(L2=1 | L5Rs=1, CB32=1) = 0.9883$$

对上述概率求算数平均为 0.9906,由计算结果可以判断,元件 L2 发生了故障。

图 4 为 L2 故障时应发生的保护动作链,与采集到的信号对比可知,在 L2 发生故障引发左右保护动作后, L2Rm、L2Sm、CB12 发生了拒动,继而引发了远后备保护 T3s、T4s 和 L5Rs 的动作。

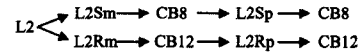


图 4 L2 故障保护动作链

4.2 复合故障的行为分析

监控中心收到如下信息, L1Sm(45ms)、L1Rp(49ms)、B1m(115ms)、L3Rs(556ms) 动作, 断路器 CB7(81ms)、CB11(83ms)、CB4(94ms)、CB5(95ms)、CB6(96ms)、CB28(575ms) 断开。

由递归溯因推理可得:

B1 汇入库所最终状态为

$$M_6 = \{ \dots, \langle B1, \{ (0, [16, 46], \{ L3Rs=1, CB28=1 \}) \} \rangle \}$$

L1 汇入库所最终状态为:

$$M_6 = \{ \dots, \langle B1, \{ (0, [5, 35], \{ L1Sm=1, CB7=1 \}) \} \rangle, \langle 0, [1, 51], \{ L1Sp=0, CB7=1 \} \rangle, \langle 0, [9, 39], \{ L1Rp=1, CB11=1 \} \rangle, \langle 0, [3, 53], \{ L1Rm=0, CB11=1 \} \rangle \}$$

L3 汇入库所最终状态为:

$$M_6 = \{ \dots, \langle L3, \{ (-1, [-497, -447], \{ L1Rs=0, CB11=1 \}) \} \rangle \}$$

代表 B1、L1 故障的汇入库所内分别有 1 个和 4 个令牌,且没有冲突令牌,因此 B1、L1 故障假设成立。L3 汇入库所中有且仅有一个冲突令牌,因此 L3 故障假设不成立。

根据事件的因果关系和表 1、表 2 中的先验概率,以式 (3) 计算 B1、L1 的故障概率:

$$P(B1=1 | L3Rs=1, CB28=1) = 0.7171$$

$$P(L1=1 | L1Sm=1, CB7=1) = 0.9883$$

$$P(L1=1 | L1Rp=1, CB11=1) = 0.9883$$

$$P(L1=1 | L1Sp=0, CB7=1) = \epsilon$$

$$P(L1=1 | L1Rm=0, CB11=1) = \epsilon$$

求 $P(L1=1)$ 算数平均为 0.9883,由计算结果可以判断,元件 B1、L1 发生了故障。

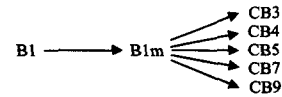


图 5 B1 故障保护动作链

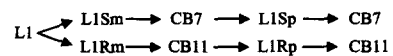


图 6 L1 故障保护动作链

图 5、图 6 分别为 B1、L1 故障时应发生的保护动作链,与采集到的信号对比可知,在 B1 发生故障引发主保护 B1m 动作后, CB9 发生了拒动,继而引发了远后备保护 L3Rs 的动作。在 L1 发生故障引发左右保护动作后, L1Rm 发生了拒

动,继而引发了后备保护 L1Rp 动作。

5 实验结果对比

TF-HBPN 建模方法引入时间因素来递归地构建分层模型,将复杂系统的故障诊断问题层层转化为简单的因果问题,运用贝叶斯概率计算验证故障假设是否成立,并得出故障发生的概率。由于诊断过程递归地构建分层模型,并对多个故障蔓延方向分别计算故障概率,因此建模难度较一般 Petri 网更低,模型更简洁易懂。图 7 所示为母线 B3 的一般 Petri 网故障模型。

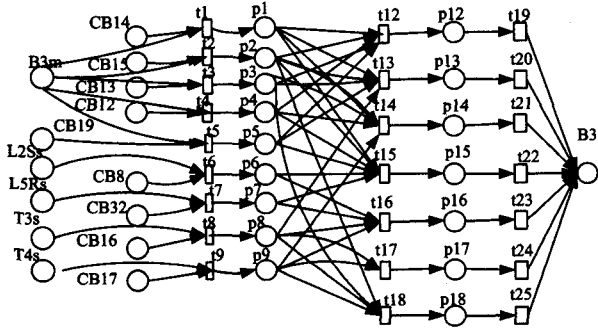


图 7 B3 的一般 Petri 网故障模型

针对图 1 所示 220kV 电力系统,以两组告警信息的诊断说明本文算法与文献[14,15]算法的不同,由表 3 可知,较文献[14,15]方法,TF-HBPN 中故障概率的计算引入了元件拒动和误动的概率,使得故障概率更为精确。

表 3 诊断效果比较

编号	获得的告警信息	诊断结果		
		文献[14]	文献[15]	本文方法
1	L2Sm(52ms)、T3s(544ms)、T4s(545ms)、L5Rs(546ms)、CB8(87ms)、CB13(520ms)、CB16(564ms)、CB17(565ms)、CB32(550ms)	P(L2)= 0.9700	P(L2)= 0.9720	P(L2)= 0.9906
	L1Sm(45ms)、L1Rp(49ms)、B1m(115ms)、L3Rs(556ms)CB7(81ms)、CB11(83ms)、CB4(94ms)、CB5(95ms)、CB6(96ms)、CB28(575ms)	P(B1)= 0.9104 P(L1)= 0.9878	P(B1)= 0.9670 P(L1)= 0.9720	P(B1)= 0.7171 P(L1)= 0.9883

结束语 在复杂系统中,随着节点数量的增加,状态的组合也将呈指数函数增长,其系统描述和分析模型将不可避免地面临组合爆炸问题。为此,本文提出一种扩展了时间因素的分层贝叶斯 Petri 网模型(TF-HBPN),该模型具有以下特点:

1) TF-HBPN 建模方法引入时间因素来递归地构建分层模型,将复杂系统的故障诊断问题层层转化为简单的因果问题,使其建模难度较一般 Petri 网更低,模型更简洁易懂;

2) TF-HBPN 结合了时间 Petri 网在分析离散事件动态系统时序属性上的优势及贝叶斯概率方法善于处理不确定性知识表达及推理的特点,可在不假定知识集完备的情况下,进行递归时间溯因推理和贝叶斯概率计算;

3) 复杂系统中,短时间内产生的大量连续动作及其干扰信息给常规的行为分析方法带来混感,时序一致性验证有助于排除干扰源、缩小待分析的结果集;

4) 结合贝叶斯方法的系统行为辨识使用了基于统计的先验概率来求取具体情况下事件发生的概率,避免了常见 Petri

网推理方法中直接对计算参数进行人为设定而造成主观性误差,计算结果具有较高的可信度。

参考文献

- [1] LUO Xu, Kezunovic Mladen. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685
- [2] 余维,叶阳东.一种基于贝叶斯 Petri 网的故障诊断方法[J].小型微型计算机系统,2011,32(11):2303-2308
She Wei, Ye Yang-dong. Power System Fault Diagnosis Method Based on Bayesian Petri Nets[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(11): 2303-2308
- [3] 蔡露,许黎明,柴运东,等.基于 Petri 网模型的顺序离散事件机电系统在线 Bayes 故障诊断方法[J].上海交通大学学报,2011,45(11):1643-1652
Cai Lu, Xu Li-ming, Chai Yun-dong, et al. Fault Diagnosis with Bayes of Sequential Discrete Event Mechatronic Systems Based on Petri Net [J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2011, 45(11): 1643-1652
- [4] 栗然,仇晓龙.基于模糊 Petri 网的输电网故障诊断改进方法[J].中国电力,2008,41(5):50-54
Li Ran, Qiu Xiao-Long. Improvement in fault diagnosis of transmission network using fuzzy Petri net [J]. Electric Power, 2008, 41(5): 50-54
- [5] 张丹,余维,叶阳东.基于模糊有色 Petri 网的故障诊断方法[J].计算机工程与设计,2013,34(11):3396-4001
Zhang Dan, She Wei, Ye Yang-dong. Fault Diagnosis Method Based on fuzzy-colored Petri Nets [J]. Computer engineer and design, 2013, 34(11): 3396-4001
- [6] 康泰峰,吴文传,张伯明,等.基于时间溯因推理的电网诊断报警方法[J].中国电机工程学报,2010,30(19):84-90
Kang Tai-feng, Wu Wen-chuan, Zhang Bo-ming, et al. Temporal Abductive Reasoning Based Diagnosis and Alarm for Power Grid [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2010, 30(19): 84-90
- [7] 杨健维,何正友.基于时间约束 Petri 网的电网警报处理及故障诊断[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):77-84
Yang Jian-wei, He Zheng-you. Power systems alarm processing technology and fault diagnosis based on Petri nets with timing constraints[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 77-84
- [8] 余维,叶阳东,陈倩.基于 EFPN 的模糊离散事件系统可诊断性分析[J].计算机科学,2014,41(7):68-73
She Wei, Ye Yang-dong, Chen Qian. Diagnosability Analysis of Fuzzy Discrete Event System Based on Extended fuzzy Petri net [J]. Computer Science, 2014, 41(7): 68-73
- [9] Przytula K W, Thompson D. Construction of Bayesian networks for diagnostics[D]//Institute of Electrical and Electronics Engineers Aerospace Conference Proceedings. 2000, 5:193-200
- [10] 张继军,吴哲辉. Petri 网的分层递归模型[J].系统仿真学报,2003(15):89-92,98
Zhang Ji-jun, Wu Zhe-hui. Hierarchical Recursive Model of Petri Net[J]. Journal of System Simulatio, 2003(15): 89-92, 98
- [11] Jiang Hong, Ding Xiang-qian, Hou Rui-chun, et al. Modeling of Hierarchical Petri Net-Based Workflow[C]//IEEE International Conference on Computing, Control & Industrial Engineering. 2011:113-116

(下转第 102 页)

- [14] Thomas R K, Sandahu R. Task-based authentication controls (TABC): a family of models for active and enterprise-oriented authentication management[C]//Proc of IFIP Workshop on Database Security. 1997;165-172
- [15] Han R F, et al. A united access control model for systems collaborative commerce[J]. Journal of Networks, 2009, 4(4): 279-290
- [16] Yu Ding-guo. Role and task-based access control model for Web service integration[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(7): 2681-2689
- [17] Rajender N, Gulshan A. An authorization mechanism for access control of resources in the web services paradigm[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2011, 2(6): 36-43
- [18] Mark S, Jan M. Modeling process-related RBAC models with extended UML activity models[J]. Information and Software Technology, 2011, 53(2): 456-483
- [19] Ganna M, Brucker A D, et al. Security and safety of assets in business processes[C]//Proc of the 27th Symposium on Applied Computing. 2013;1667-1673
- [20] Doglas R, Estrella J C, et al. Analysis of security and performance aspects in service-oriented architectures[J]. International Journal of Security and Its Applications, 2011, 5(1): 13-30
- [21] 魏永合. 工作流环境下访问控制技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009
- We Yong-he. Research on Technology of Access Control under Workflow[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009
- [22] Samuel J B. Modeling and enforcing workflow authorizations[D]. Zurich: Eth Zurich, 2012
- [23] David B, Samuel J B, et al. Separation of duties as a service[C]//Proc of the 6th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security. 2013;423-429
- [24] Bernhand H, Stefan S, et al. Modeling and enforcing secure object flows in process-driven SOAs: an integrated model-driven approach[J]. Software and Systems Modeling, 2012, 5(2): 1-36
- [25] Frederica P, Bertino E. An access-control framework for WS-BPEL[J]. International Journal of Web Services Research, 2008, 5(3): 20-43
- [26] 上超望, 刘清堂, 等. 使用控制支持的组合 Web 服务业务流程动态访问控制模型研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2011, 57(5): 408-412
- Shang Chao-wang, Liu Qing-tang, et al. A Research on UCON Enhanced Dynamic Access Control Model for the Business Process of Composite Web Services[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), 2011, 57(5): 408-412
- [27] Rafael A. An approach to data-driven detective internal controls for process-aware information Systems[C]//Workshop on Data Usage Management on the Web 2012. 2012;20-25
- [28] Bertino E, Martino D L, et al. Security for Web services and service-oriented architectures[M]. Berlin: Springer, 2010;170-175
- [29] Ahmed A. A compliance management framework for Business Process models[D]. Potsdam: University Of Potsdam, 2010
- [30] Mohsen R. Security analysis for web services compositions [J]. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2012, 3(5): 1-8
- [31] Alberto C, Silvio R, et al. Automated validation of security-sensitive Web Services specified in BPEL and RBAC[C]//Proc of the 12th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing. 2010;456-464
- [32] Maria L, Juergen M, et al. SPRINT-responsibilities: design and development of security policies in process-aware information systems[J]. Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications, 2011, 2(4): 4-26
- [33] Manuel M, Nicola D. Implementing workflow reconfiguration in WS-BPEL[J]. Journal of Internet Services and Information Security, 2013, 2(2): 73-92
- [34] 许蕾, 徐宝文, 等. 一种面向用户需求的 Web 服务测试方法[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 512-522
- Xu Lei, Xu Bao-wen, et al. A Testing Method for Web Services Focusing on User Requirement[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(3): 512-522
- [35] Michel E J, Marc F, et al. Enforcing ASTD access-control policies with WS-BPEL processes in soa environments[J]. International Journal of Systems and Service-Oriented Engineering, 2011, 2(2): 37-59
- [36] Ziyi S. Applying digital rights management to corporate information systems[D]. Lyon: National Institute of Applied Sciences, 2012
- [37] Hristo K. A Survey on distributed access control systems for Web business processes[J]. International Journal of Network Security, 2009, 9(1): 61-69
- [38] Fernando L, Julio D, et al. Towards automation of soa-based Business Process[J]. International Journal of Computer Science, Engineering and Applications, 2012, 2(2): 1-17
- [39] Alfonso R, Eduardo F, et al. Secure business process model specification through a UML 2.0 activity diagram profile[J]. Decision Support Systems, 2011, 51(6): 446-465
- [40] Zahra D, Behrouz T L. A model for specification, composition and verification of access control policies and its application to Web services[J]. Journal of Information Security, 2013, 3(2): 103-120

(上接第 67 页)

- [12] 余维, 宋伟, 叶阳东. 因果链解耦的时间—概率模型[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 3536-3549
- She Wei, Song Wei, Ye Yang-dong. Time-probability model for causal chains decoupling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(10): 3536-3549
- [13] 吴欣, 郭创新. 基于贝叶斯网络的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 11-13
- Wu Xin, Guo Chuang-xin. Power System Fault Diagnosis Approach Based on Bayesian Network [J]. Proceedings of the CenterSouth University-The Electric Power Supply Association, 2005, 17(4): 11-13
- [14] 童晓阳, 谢红涛, 孙明蔚. 计及时序信息检查的分层模糊 Petri 网电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 63-68
- Tong Xiao-yang, Xie Hong-tao, Sun Ming-wei. Power systems fault diagnosis Model of Hierarchical fuzzy Petri Net of Check the meter and timing information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 63-68
- [15] 孙静, 秦世引, 宋永华. 模糊 Petri 网在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 74-79
- Sun Jing, Qin Shi-yin, Song Yong-hua. Fuzzy Petri Nets and its Application in the Fault Diagnosis of Electric Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 74-79