



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140098

## 基于新型扩展模糊 Petri 网的食物冷链故障诊断方法

晏爽, 李孝忠

(天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 针对生鲜食品在冷链配送过程中容易发生变质的问题, 并考虑冷链过程的时序性特点, 提出一种基于新型扩展模糊 Petri 网 (EFPN) 的故障诊断方法. 该方法通过将模糊规则映射到扩展模糊 Petri 网, 对故障诊断过程中的不确定性问题进行定量分析, 从而得到引起故障的原因. 利用库所带有的关键因素开始时间信息可排除未发生的因素, 降低诊断推理过程的复杂程度. 最后通过实例对该模型进行了验证和分析.

**关键词:** 冷链故障诊断; 模糊 Petri 网; 时间信息; 食品安全

**中图分类号:** TP301.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2015)02-0065-05

## Fault Diagnosing Method of Food Cold Chain Based on New Extended Fuzzy Petri Net

YAN Shuang, LI Xiaozhong

(College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of perishable food in the cold chain process and its temporal characteristics, a fault diagnosing method was proposed based on a new kind of Extended Fuzzy Petri Net (EFPN). This method can do quantitative analysis of uncertainties in the process of fault diagnosis and find out the causes of malfunction by mapping the fuzzy rule to Fuzzy Petri Net. The method can tell us when and what key problems will happen so as to exclude the events before they occur. It can reduce the complexity of the inference process. Finally, the model was verified and analyzed with examples.

**Key words:** cold chain fault diagnosis; fuzzy Petri net; time information; food safety

近年来, 食品安全问题已被越来越多的人所关注, 对冷链物流的关注度也随之急剧升温. 所谓冷链物流是指冷藏冷冻类食品在生产、贮藏运输、销售等到消费前的各个环节中始终处于规定的低温环境下, 以保证食品质量, 减少食品损耗的一项系统工程<sup>[1]</sup>. 与普通物流的区别不仅在于食品对卫生环境的要求极高, 更重要的是易腐食品对温度与时间控制有严格的要求, 可以说冷链是特殊的供应链.

目前, 故障诊断领域已有一些行之有效的技术和方法, 如专家系统<sup>[2]</sup>、贝叶斯网<sup>[3]</sup>、Petri 网<sup>[4]</sup>等, 但关于食品冷链故障诊断的研究较少, 更多的是针对冷链安全风险评估. 这两者是不同的, 前者的目的是找出引起冷链故障的原因, 后者则是对冷链系统存在的风险及风险程度的评价.

在故障诊断方面, 刘俊<sup>[5]</sup>提出的 SCOR 绩效评价是供应链诊断最常见的方法, 但当有大量评价指标时, 该方法并不能快速准确地诊断出故障因素. 针对此缺点, 王冬冬等<sup>[6]</sup>借鉴机器零件故障诊断的原理, 构造了一种基于模糊 Petri 网并且参照绩效评价指标的供应链诊断模型, 其以模糊产生式规则为基础, 并利用 Petri 网的图形描述能力, 清晰地表示各因素间的相互关系, 通过仿真证明了模型的正确性与算法的有效性. 基于基础的模糊 Petri 网<sup>[7]</sup>, 根据不同的需求, 学者们设计了不同的扩展模糊 Petri 网: Barzegar 等<sup>[8]</sup>将着色 Petri 网与模糊 Petri 网结合用于解决城市交叉路口的混沌行为, 显著减少了车辆等待的时间; 尹

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61070021, 11301382)

作者简介: 晏爽 (1987—), 女, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 李孝忠, 教授, lixz@tust.edu.cn.

久等<sup>[9]</sup>在模糊 Petri 网的基础上将时间因素嵌入到离散状态对连续过程的影响,用于描述陶瓷生产过程的能量碳流过程,并可以找出碳排放源. 在时间 Petri 网方面, Merlin 等<sup>[10]</sup>为每个变迁赋予相应的时间区间来说明变迁的激发实在区间内的某个时间点; Ramchandani<sup>[11]</sup>提出对每个变迁赋予一个整数,用来表示变迁发生需要持续的时间,这两种 Petri 网是比较重要的两类含有时间因素的 Petri 网,其中时延 Petri 网又可以分为变迁或库所含时间因素两类. Liu 等<sup>[12]</sup>考虑到过程的滞后性,提出时延 Petri 网概念,为各个变迁赋予一个时间值,用于记录了化学反应的时间延迟信息,并用于故障的预测和诊断. Sifakisi<sup>[13]</sup>在每个库所上关联一个时间值,用于分析系统的“时间驱动”. 从考虑托肯的角度出发,第 1 种时延 Petri 网的变迁的激发并不是瞬时的,在激发过程当中并不能描述托肯的位置,第 2 种时延 Petri 网由于变迁的激发是瞬时的,托肯在库所当中停留一段时间,可以清楚地分析托肯的变化.

从以上研究可以看出,对于供应链诊断问题一般是根据每个关键因素对供应链整体绩效的程度来快速找到导致其发生故障的原因,但在食品冷链故障诊断当中,由于各关键因素的时序性特点且各因素之间关系复杂,用以往的基础方法不能得到准确结果. 因此,本文基于 Petri 网可以与其他条件相关联的特性以及冷链物流时序性的特点,定义一种库所携带时间信息的新型扩展模糊 Petri 网(extended fuzzy Petri nets, EFPN),并用于食品冷链故障诊断.

### 1 扩展模糊 Petri 网

#### 1.1 扩展模糊 Petri 网的定义

在文献<sup>[14-15]</sup>的基础上,定义一种带有时间信息的 EFPN 模型. EFPN 定义为一个十一元组

$$\sum_F = (P, T, D, I, O, \alpha, \beta, f, \lambda, C, b)$$

其中:

$P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$  为有限库所集;

$T = (T_1, T_2, \dots, T_m)$  为有限变迁集;

$D = (D_1, D_2, \dots, D_n)$  为有限命题集;

$P \cap T \cap D = \emptyset, |P| = |D|$ ;

$I(O): P \rightarrow T^\infty (T \rightarrow P^\infty)$  为输入(输出)函数,表示库所与变迁之间的映射关系;

$\alpha: P \rightarrow [0,1]$  为映射库所到其置信度的关联函数,即库所对应的命题成立的可信度,  $\alpha(P_i) \in [0,1]$ ,

$i = 1, 2, \dots, n$ ;

$\beta: P \rightarrow D$  为库所与命题之间的关联函数,  $\beta(P_i) = D_i, i = 1, 2, \dots, n$ ;

$f: T \rightarrow [0,1]$  为映射变迁到其确信因子的关联函数,即变迁对应的推理规则的置信度(CF),  $f(T_i) \in [0,1], i = 1, 2, \dots, m$ ;

$\lambda$ : 变迁的激活阈值,  $\lambda(T_i) \in [0,1], i = 1, 2, \dots, m$ , 对于  $\forall P_i \in I(T_i)$ , 当  $\alpha(P_i) \geq \lambda(T_i)$  时, 变迁  $T_i$  才有可能被激活;

$C: P \rightarrow \mathbf{R}$ , 其中  $\mathbf{R}$  是正实数集,  $C$  是库所对应时间的关联函数,  $C(P_i) = a_i, a_i \in \mathbf{R}, P_i$  中的托肯要停留  $a_i$  个时间单位, 变迁才可以发生, 而且是瞬时的.

$b: b \in \mathbf{R}$ , 代表模型的全局时间, 用于查看在  $b$  时刻前哪些库所被激发, 当累计时间小于  $b$  时, 变迁才有可能被激活, 符合时间条件的库所被称为有效库所, 包含有效库所的集合称为有效库所集  $G$ .

基于传统模糊 Petri 网的使能规则<sup>[6]</sup>, EFPN 还需考虑到只有变迁的输入库所属于有效库所集时才是使能的.

为更好地说明该 Petri 网模型, 给出图 1 所示的例子. 其中, 可信度  $\alpha(P_1) = 0.7, \alpha(P_2) = 0.8, \alpha(P_3) = 0.9$ ; 置信度  $CF_1 = 0.8, CF_2 = 0.93, CF_3 = 0.96$ ;  $\lambda = 0.65$ ;  $C(P_1) = 2, C(P_2) = 3, C(P_3) = 6, b = 5$ .

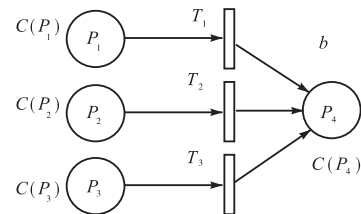


图 1 扩展模糊 Petri 网示例  
Fig. 1 Example of EFPN

按照反向推理算法<sup>[16]</sup>, 由于  $P_3$  对应的变迁  $T_3$  的置信度( $CF_3 = 0.9$ )最大, 应该选择回溯路径  $P_4 \rightarrow P_3$ , 但实际  $b = 5$ , 只考虑 5 个单位时间内任务的完成情况,  $P_3$  并非有效库所, 有效库所集当中只有  $P_1, P_2$ , 且  $CF_2 > CF_1$ , 所以回溯路径应为  $P_4 \rightarrow P_2$ ,  $\alpha(P_4) = \alpha(P_2) \times CF_2 = 0.8 \times 0.93 = 0.74$ . 可见, 因时间阈值的引入, 排除了本不应该考虑的因素, 更具有实际意义.

#### 1.2 模糊产生式规则

模糊产生式规则(fuzzy production rule, FPR)表示了条件与结论的因果关系. 模糊 Petri 网的规则通常包括一对一类型、在模糊规则中加上“and(与)”

及“or(或)”算符形成的复合模糊规则,其主要思想是,模糊命题合取式的真值取各子式真值的最小值,模糊命题析取式的真值取各子式真值的最大值.

图 2 所示为一对一类型,其时间信息前后一致,对应的模糊产生式规则为

$$\alpha(P_i) \times \mu(T) \xrightarrow{P_i \in G} \alpha(P_j) \quad C(P_j) = C(P_i)$$

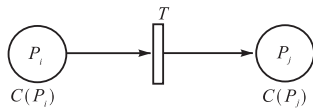


图 2 一对一类型模糊产生式规则对应的 EFPN

Fig. 2 EFPN converts from one-to-one FPR

图 3 所示为“and”类型,结果取变迁前集的最小值,对应的模糊产生式规则为

$$\min(\alpha(P_1), \alpha(P_2), \dots, \alpha(P_n)) \times \mu(T) \xrightarrow{P_i \in G} \alpha(P_j) \\ C(P_j) = \min(C(P_1), C(P_2), \dots, C(P_n))$$

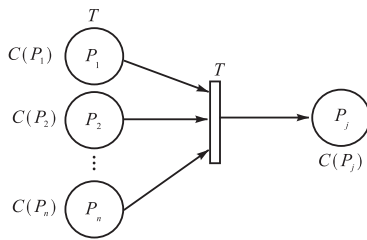


图 3 “and”类型模糊产生式规则对应的 EFPN

Fig. 3 EFPN converts from “and” FPR

图 4 所示的“or”类型,结果取变迁前集的最大值,其模糊产生式规则为

$$\max(\alpha(P_1) \times \mu(T_1), \alpha(P_2) \times \mu(T_2), \dots, \alpha(P_n) \times \mu(T_n)) \xrightarrow{P_i \in G} \alpha(P_j) \quad C(P_j) = \max(C(P_1), C(P_2), \dots, C(P_n))$$

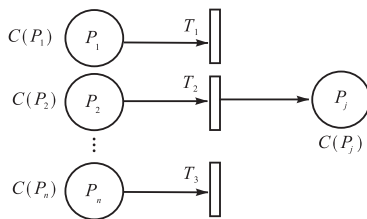


图 4 “or”类型模糊产生式规则对应的 EFPN

Fig. 4 EFPN converts from “or” FPR

## 2 基于 EFPN 的反向推理算法

### 2.1 相关库所集

初始库所集  $P_S$ :  $\exists P \in P$ , 有  $\cdot P = \emptyset$ , 则称库所  $P$  为初始库所, 由初始库所组成的集合称为初始库所

集, 一般用来表示故障原因.

目标库所集  $P_G$ :  $\exists P \in P$ , 有  $P \cdot = \emptyset$ , 则称库所  $P$  为目标库所, 由目标库所构成的集合称为目标库所集, 一般用来表示系统故障.

能达到库所集  $P_R$ : 从  $P_i$  经一系列变迁可达到库所的集合.

能立即到达库所集  $P_{IR}$ : 从  $P_i$  经一次变迁可达到库所的集合.

相邻库所集  $P_A$ : 与  $P_i$  经同一变迁可立即达到库所的集合.

不难看出  $P_R$ 、 $P_{IR}$  的建立能完成后验条件到先验条件的回溯,  $P_A$  可确定后验条件上溯的先验条件集合中是否有“and”关系.

### 2.2 推理算法

基于文献[13]中反向推理的思想和方法, 并结合冷链故障的特点, 给出以下算法:

(1) 按照相应定义对每一个 Petri 网中的库所建立目标库所、能达性集合、立即可达性集合和相邻库所集合.

(2) 从  $P_G$  中取得元素  $P_i$ , 如果  $P_G = \emptyset$ , 则跳到(5).

(3) 根据初始库所的时间信息, 计算出整个流程需要的时间并排除非有效库所.

(4) 从  $P_{IR}$  中找到相应的  $P_i$ , 首先让  $P_i$  的启动时间与故障时间进行比较, 只有满足启动时间小于故障时间的库所才被考虑, 然后按照冲突消解策略选取规则置信度最大的变迁, 根据这个原则向前进行推理; 若  $P_i$  没有符合条件的输入变迁, 则进行回溯.

(5) 对于找到的故障路径, 根据变迁的激发规则进行计算, 若满足激发规则, 得到最后结果, 结束推理; 若不满足激发规则, 则需要回到步骤 4 进行回溯.

## 3 实例

### 3.1 冷链物流诊断模型的建立

从集货、仓储流通、散货三大冷链流程出发, 参照 HACCP 体系<sup>[17]</sup>在冷链物流食品安全方面的运用, 并且考虑到冷链过程的复杂性, 为避免忽略重要的步骤, 要保证流程的完整. 选择出对冷链物流食品安全有重要影响、容易发生故障的几个关键因素, 建立库所带有时间因素的 EFPN 食品冷链故障诊断模型. 在集货方面, 温度控制、采购验收、卸货搬运对冷链食品安全有比较大的影响; 在仓储流通方面, 关键影响

因素为预加工、拣货、配货、定时补货的操作水平；在散货方面，车辆安排与运输为关键影响因素。根据上述情况，建立了某冷藏物流中心的 EFPN 故障诊断模型如图 5 所示。库所和命题的含义见表 1 和表 2。本文从冷链流程(时序)角度结合 EFPN 进行反向推理诊断。

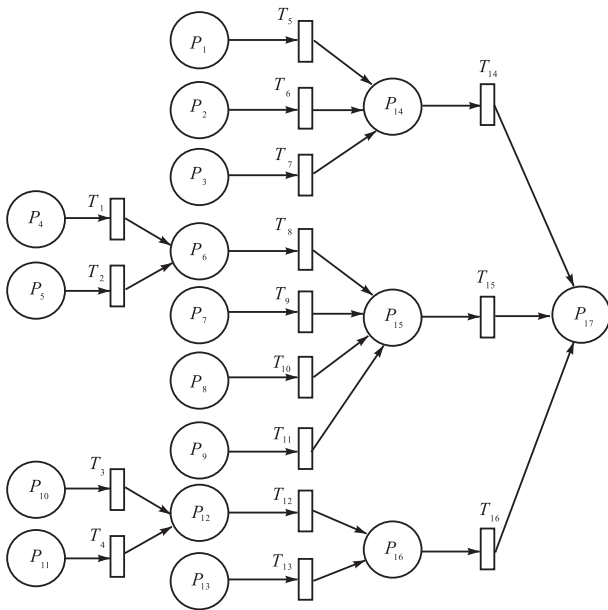


图 5 基于扩展模糊 Petri 网的食物冷链故障诊断模型  
Fig. 5 Fault diagnosing model of food cold chain based on the extended fuzzy Petri net

表 1 食品冷链诊断模型各库所含义及作用时间  
Tab. 1 Meaning of each places and its function of time for the fault diagnosing model of food cold chain

库所	含义	作用时间/min
$P_1$	仓库温度水平	30
$P_2$	验货水平	10
$P_3$	卸货水平	20
$P_4$	防腐水平	20
$P_5$	预冷水平	30
$P_6$	预加工水平	
$P_7$	拣货水平	18
$P_8$	配货水平	15
$P_9$	定时补货水平	53
$P_{10}$	车辆检查水平	12
$P_{11}$	装货水平	30
$P_{12}$	货物出库水平	
$P_{13}$	货物运输水平	80
$P_{14}$	集货水平	
$P_{15}$	仓储流通水平	
$P_{16}$	散货水平	
$P_{17}$	食品冷链运作水平	

表 2 食品冷链诊断模型的命题含义

Tab. 2 Propositional meaning of the fault diagnosing model of food cold chain

库所	含义	库所	含义
$D_1$	仓库温度控制不好	$D_{10}$	车厢温度偏高
$D_2$	数量、品类不对	$D_{11}$	货品破损引入细菌
$D_3$	货品破损引入细菌	$D_{12}$	安排车辆故障
$D_4$	防腐水平不达标	$D_{13}$	运输天气过热
$D_5$	预冷水平不达标	$D_{14}$	集货水平不达标
$D_6$	预加工环节发生故障	$D_{15}$	流通水平不达标
$D_7$	拣货环节发生故障	$D_{16}$	散货水平不达标
$D_8$	配货环节发生故障	$D_{17}$	冷链过程运作出现故障
$D_9$	定时补货发生故障		

### 3.2 模型分析

按照以上规则的 EFPN 定义，起始库所集合  $P_S = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}\}$ ，目标库所集合  $P_G = \{P_{17}\}$ ，直接可达库所集  $IRP$  和相邻库所集  $P_A$  如表 3 所示。根据该冷藏物流中心实际情况，通过专家打分的方法对这些库所中命题的真实程度进行推断，各个变迁的置信度  $CF_1 = 0.7, CF_2 = 0.92, CF_3 = 0.8, CF_4 = 0.73, CF_5 = 0.69, CF_6 = 0.80, CF_7 = 0.88, CF_8 = 0.74, CF_9 = 0.88, CF_{10} = 0.80, CF_{11} = 0.82, CF_{12} = 0.90, CF_{13} = 0.89, CF_{14} = 0.76, CF_{15} = 0.90, CF_{16} = 0.91$ 。所有变迁的启动阈值均为 0.70。

(1) 根据建立的模型，配货 (15 min) 与车辆检查 (12 min)、补货 (53 min) 与货物运输 (80 min) 具有并发性，基于取大原则，这两个并发过程的时间分别为 15、80 min，所以整体运作时间为  $30 + 10 + 20 + 20 + 30 + 18 + 15 + 30 + 80 = 253$  min。超市使用气味指纹识别技术<sup>[18]</sup>测出食品开始变质时间是 120 min 前 ( $b = 120$  min)。

(2) 目标库所  $P_{17}$  (冷链故障) 在表中的相邻库所为  $\emptyset$ ，说明没有其他故障同时发生。

(3) 查表 3 得知，引起  $P_{17}$  发生的库所有  $P_{14}$ 、 $P_{15}$ 、 $P_{16}$ ，由于  $b = 120$  min， $253 - 120 = 133$  min，只有在 133 min 内的任务可以发生，可知  $30 + 10 + 20 + 20 + 30 + 18 = 128$  min，即问题出现在车辆检查与配货之前， $P_9$ 、 $P_{10}$ 、 $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{13}$ 、 $P_{16}$  非有效库所。虽然  $P_{16}$  对应的规则置信度最大，但由于其未发生，所以不考虑。排除  $P_{16}$  后， $P_{15}$  对应的规则置信度 ( $CF_{15} = 0.90$ ) 最大，所以选择路径  $P_{15}$  至  $P_{17}$ 。

(4) 由于  $P_{15}$  不是起始库所，继续向前寻找引起故障的原因。排除非有效库所  $P_9$  后， $P_7$  的规则置信度最大，选择回溯路径  $P_7 \rightarrow P_{15}$ 。

(5) 通知用户检查物流中心的拣货情况，如用户回答不正常，则根据统计信息可以得到  $P_5$  的可信度

为  $\alpha(P_7) = 0.93, \alpha(P_{15}) = \alpha(P_7) \times CF_9 = 0.93 \times 0.88 = 0.82, \alpha(P_{17}) = \alpha(P_{15}) \times CF_{15} = 0.82 \times 0.9 = 0.74$ , 命题可信度均大于变迁启动阈值, 推理成功, 诊断结束. 若用户的回复为正常, 则回溯到  $P_{15}$  继续寻找故障原因, 至找出原因为止.

表3 直接可达库所集  $P_{IR}$  和相邻库所集  $P_A$

Tab.3 Direct up to place base set  $P_{IR}$  and the adjacent place base set  $P_A$

$P$	$P_{IR}$	$P_A$	$P$	$P_{IR}$	$P_A$
$P_1$	$P_{14}$	$\emptyset$	$P_{10}$	$P_{12}$	$\emptyset$
$P_2$	$P_{14}$	$\emptyset$	$P_{10}$	$P_{12}$	$\emptyset$
$P_3$	$P_{14}$	$\emptyset$	$P_{11}$	$P_{12}$	$\emptyset$
$P_4$	$P_6$	$\emptyset$	$P_{12}$	$P_{16}$	$\emptyset$
$P_5$	$P_6$	$\emptyset$	$P_{13}$	$P_{16}$	$\emptyset$
$P_6$	$P_{15}$	$\emptyset$	$P_{14}$	$P_{17}$	$\emptyset$
$P_7$	$P_{15}$	$\emptyset$	$P_{15}$	$P_{17}$	$\emptyset$
$P_8$	$P_{15}$	$\emptyset$	$P_{16}$	$P_{17}$	$\emptyset$
$P_9$	$P_{15}$	$\emptyset$	$P_{17}$	$\emptyset$	$\emptyset$

## 4 结 语

本文根据含有时间信息的 EFPN 建模思想及反向诊断推理规则, 建立了一种适用于食品冷链过程的故障诊断模型, 可对故障诊断过程中的某些不确定性问题进行定量分析. 该模型能较好地表示和处理模糊知识, 其推理机制按照变迁可信度的大小可以反向寻找一条最可能产生已知故障的路径, 从而能加快推理速度. 在模型中引入的时间信息可以有助于排除干扰因素, 提高诊断结果的准确性并且减少推理时间. 最后, 通过对食品冷链故障的实例分析验证了该模型有效性. 诊断模型可以提供给相关部门, 如卫生行政部门、质量检测中心等, 为改善与优化食品冷链过程提供决策信息. 由于冷链过程的时序复杂性, 建立模型时需要考虑全部冷链步骤, 以保证推理的有效性, 如何更好地将复杂模型简化并进行有效推理, 是今后继续研究的一个方向.

### 参考文献:

- [1] 叶建恒. 冷链物流管理[M]. 北京:北京师范大学出版社, 2011:10.
- [2] 张帆, 金红核, 袁成, 等. 基于目标优先的变电站仿真智能评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19):33-38.
- [3] 宋功益, 王晓茹, 周曙. 基于贝叶斯网的电网多区域复杂故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7):20-25.
- [4] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34):42-49.
- [5] 刘俊. 基于 SCOR 绩效评价的供应链诊断模型[J]. 物流科技, 2006, 29(11):46-48.
- [6] 王冬冬, 达庆利. 基于模糊 Petri 网的供应链诊断建模分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2006, 36(4):662-666.
- [7] 何新贵. 模糊 Petri 网[J]. 计算机学报, 1994, 17(12):946-950.
- [8] Barzegar S, Davoudpour M, Meybodi M R, et al. Formalized learning automata with adaptive fuzzy colored Petri net: An application specific to managing traffic signals[J]. Scientia Iranica, 2011, 18(3):554-565.
- [9] 尹久, 曹华军, 杜彦斌, 等. 基于广义模糊 Petri 网的陶瓷生产过程能量碳流模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4):1035-1040.
- [10] Merlin P M, Farber D J. Recoverability of communication protocols-implications of a theoretical study[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(9):1063-1043.
- [11] Ramchandani C. Analysis of Asynchronous Concurrent Systems by Petri Nets[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Project Mac, 1974.
- [12] Liu Z, Li H, Zhou P. Towards timed fuzzy Petri net algorithms for chemical abnormality monitoring[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1):9724-9728.
- [13] Sifakis J. Use of Petri nets for performance evaluation[J]. Acta Cybernetica, 1980, 4(2):185-202.
- [14] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:264-265.
- [15] 付阶辉. 基于 Petri 网的故障诊断方法研究[D]. 南京:东南大学, 2004.
- [16] Hu H, Li Z, Al-Ahmari A. Reversed fuzzy Petri nets and their application for fault diagnosis[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(4):505-510.
- [17] 赵艳艳, 张于贤. HACCP 体系在我国冷链物流管理中的运用及优化[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(7):3273-3274.
- [18] 肖虹. 冷却肉气味指纹识别技术及冷链中 RFID 技术应用的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2011.

责任编辑:常涛