

控制与决策

Control and Decision

标签Petri网的路径信息在故障诊断中的应用

叶丹丹, 吴维敏, 苏宏业

引用本文:

叶丹丹, 吴维敏, 苏宏业. 标签Petri网的路径信息在故障诊断中的应用[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 325–334.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0698>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于交叉熵的改进NPE间歇过程故障检测算法

Improved NPE batch process fault detection algorithm based on cross entropy
控制与决策. 2021, 36(2): 411–417 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0725>

基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型

Multi-component system state space partition model based on Markov process
控制与决策. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

改进集成深层自编码器在轴承故障诊断中的应用

Application of improved ensemble deep auto-encoder in bearing fault diagnosis
控制与决策. 2021, 36(1): 135–142 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0270>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays
控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

基于不变网络模型和故障注入的分布式信息系统故障溯源方法

Fault source location algorithm for distributed information system based on invariant network and fault injection
控制与决策. 2020, 35(11): 2723–2732 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0214>

标签 Petri 网的路径信息在故障诊断中的应用

叶丹丹, 吴维敏[†], 苏宏业

(1. 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 杭州 310000; 2. 浙江大学 智能系统与控制研究所, 杭州 310000)

摘要: 针对一类由标签 Petri 网模拟的离散事件系统的故障问题, 提出一种利用网结构中路径信息的诊断方法. 假设标签 Petri 网模型的网结构是已知的, 隐藏在系统传感器或者执行机构中的故障用不可观测的变迁或者可观测且标记不可分辨的变迁模拟. 首先, 在故障诊断过程前, 提出网结构转化规则转化原始 Petri 网; 随后, 在转化后 Petri 网的子网中, 划分出若干条特定路径, 解析多种路径间的约束关系; 最后, 利用路径间约束关系制定相应的约束规则, 导出系统故障诊断的结果, 并针对其中不确定的情况分析故障发生的概率大小. 该方法基于路径信息的全新视角进行故障诊断, 其贡献之一是得益于网结构转化规则, 删除冗余结点, 缩减内存成本. 另一个贡献是由于网结构中路径数量有限, 该故障诊断方法无需遍历系统状态空间, 具有多项式级计算复杂性, 满足实时性要求.

关键词: 离散事件系统; 故障诊断; 标签 Petri 网; 子网信息, 网结构转化规则, 路径约束

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0698

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 叶丹丹, 吴维敏, 苏宏业. 标签 Petri 网的路径信息在故障诊断中的应用 [J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 325-334.

Application of path information of labeled Petri nets in fault diagnosis

YE Dan-dan, WU Wei-min[†], SU Hong-ye

(1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China; 2. Institute of Intelligent System and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Concerning the fault diagnosis problem of a discrete event system which is modeled by a labeled Petri net, a structure based approach that utilizes the properties of paths is presented. Assuming the structure of the labeled Petri net is known, faults which are hidden in sensors or executing devices are modeled by unobserved transitions and some other observed transitions that are labeled the same with the regular ones. Firstly, several transformation rules are provided to simplify a priori, the structure of the labeled Petri net, before the diagnostic procedure. Then, multiple path constrains can be derived through partitioning the transformed Petri net into particular paths. Finally, with the corresponding path constrains, some constrain rules can be formulated, then the results of fault diagnosis are characterized after observing a labeled sequence with the use of the constrain rules, moreover, the probability of fireable of the fault for the uncertain situation can be analyzed. One of the contributions of this work is scaling down the memory cost with the transformation rules. The other one is no more seeking the system state space for fault transitions benefiting from the structural constrains. Moreover, the computational complexity of the diagnostic process can be much reduced owing to the limited number of paths.

Keywords: discrete event systems; fault diagnosis; labeled Petri nets; sub-net information; net structure conversion rule; path constrains

0 引言

离散事件系统(DES)是一类由事件驱动的动态系统. 当检测到传感器的信号或系统中执行设备的动作时, 离散事件系统中的状态进行切换. 离散事件系统存在于如此多的智能系统中, 包括机器人系统、制造系统、运输系统等. 随着系统规模的增长, 其安

全问题得到越来越多的关注.

安全问题在许多复杂系统的领域中发挥着重要作用, 例如离散事件系统. 在一些离散事件系统中, 由于某些传感器和执行设备的信息无法获取, 这些部件中隐藏的故障无法准确地判断是否发生. 一旦发生这种类型的故障, 生命和财产的安全可能受到极

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-09-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773343, 61621002, 61573158).

责任编委: 何勇.

[†]通讯作者. E-mail: wmwu@zju.edu.cn.

大的威胁. 因此, 针对离散事件系统的传感器和执行设备, 其故障诊断是一个至关重要的技术问题. 一旦检测到故障, 应立即采取一些措施(例如修改控制算法), 以便系统可以安全地推进操作. 在离散事件系统领域, 故障诊断问题已经研究了几十年^[1-3]. 离散事件系统中的故障诊断问题已通过基于模型的方法得到解决. 在以往的相关文献中, 采用有限状态自动机模型构造诊断器自动机^[4-7]. 特别地, 构建一个诊断器可以用于在线监视离散事件系统中的故障. 此外, 诊断器可以在观察到有限长度的事件序列后检测故障是否发生. 但随着系统规模的增长, 模型构建的复杂性需要考虑. 因此, 考虑到离散事件的状态空间爆炸问题以及Petri网的分布性特征, Petri网模型取代有限状态自动机模型来模拟系统行为^[8-9]. 基于不同的Petri网模型, 学者提出了不同的离散事件系统的故障诊断方法. 在众多贡献中, 简单地回顾一些基于不同Petri网模型进行的故障诊断方法: 文献[10]利用一个解释Petri网的模型描述状态和事件均部分可观测的系统行为. 更确切地说, 首先从在线算法中导出解释的Petri网模型, 继而提出了一种基于解决规划问题的故障诊断方法. 文献[11]提出了基础标识和最小解释量的定义, 最小解释量是观测到一个可观事件序列激发后, 必须激发的最小不可观事件序列. 利用这两个元素, 构建一种基础可达图缩减原始Petri网的可达图中的状态量. 此外, 文献[12]将基础标识和最小解释量的概念扩展到具有不可观测或不可分辨的故障事件的标记的Petri网系统中. 该模型中事件是部分可观测的, 状态是不可观测的. 该故障诊断方法无需穷举系统的所有状态, 但是需要将基础标识的所有子集列举出来, 随着系统规模的增大, 计算复杂性会呈现指数级增长. 文献[13]提出了一种分布式协议, 旨在解决大型系统中的故障诊断问题. 一旦某些特定条件成立, 变迁使能会导致时间Petri网模型可以彼此交互. 文献[14]给出了一种基于标签的Petri网的故障诊断方法, 该模型中事件和状态均为部分可观测. 通过在可观库所上加置观测器的方法, 将原始部分可观Petri网模型转化为标签Petri网模型. 同时可以通过在线监视器计算故障发生的置信度. 文献[15]利用线性规划问题的解决方法提出了一个基于部分可观Petri网模型的在线诊断器. 同时为了解决算法中的计算复杂度问题, 提出了一个充分条件, 即得到一个整数线性规划问题的整数解. 以这种方式, 其故障诊断算法的计算复杂度可以是多项式级

的. 文献[16]利用有色Petri网模型预估执行装置可能处于的各种状态. 由于提出的诊断器监控整个执行装置, 该方法不会改善先前基于自动机模型的状态爆炸问题. 文献[17]关注由普通Petri网建模的故障行为. 为了精确预测给定的激发序列, 系统的状态是可观的. 继而基于最小诊断器的定义, 激发的故障变迁可以被立即检测和隔离.

在所有这些文献中, 大多数方法可以分为两类: 编译诊断器法^[18]和解释诊断法^[19]. 在本文中, 唯一关注的故障类型是隐藏在离散事件系统的传感器和执行设备中的故障. 本方法的核心思想是获得路径之间的多种路径约束关系, 并将它们映射到不同的规则中. 利用这些约束规则, 向后搜索可观察事件序列并导出诊断结果. 本文的最大优点是基于网结构的转化规则和路径结构信息, 避免在整个状态空间中搜索故障状态. 对于涉及的大型复杂的离散事件系统而言, 存储器的成本也被降低.

本文内容如下: 首先介绍本文所需的一些Petri网相关的基本定义; 提供标记Petri网的网结构转化规则, 并定义特定路径之间的若干条约束关系以及由约束关系和托肯流动情况制定的约束规则; 构建故障诊断器, 并给出托肯流动进入故障路径的概率大小; 给出一个传感器和执行设备故障的生产线实例; 讨论该方法的计算复杂性, 并将此方法与传统的基础标识方法和可达图法进行比较.

1 基本概念

在本节中将讨论本文所需的Petri网的一些基本定义. 有关Petri网的更多详细介绍, 请参阅文献[20].

Petri网定义为一个四元组结构: $N = (P, T, \text{Pre}, \text{Post})$, 其中:

1) $P = \{p_j | 1 \leq j \leq m\}$ 表示库所的集合;

2) $T = \{t_i | 1 \leq i \leq n\}$ 表示变迁的集合;

3) $\text{Pre}: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ 是输入关联矩阵, 表示从库所指向变迁的加权弧;

4) $\text{Post}: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ 是输出关联矩阵, 表示从库所指向变迁的加权弧, 且 $P \cap T = \emptyset$, $C = \text{Post} - \text{Pre}$ 是关联矩阵.

在一个Petri网模型中: t_i^\bullet 表示系统中所有满足 $\text{Post}(t_i, p) \neq 0$ 的库所的集合, 即 t_i 的输出库所集合. $\bullet t_i$ 表示系统中所有满足 $\text{Pre}(p, t_i) \neq 0$ 的库所的集合, 即 t_i 的输入库所集合. 同样的, p_j^\bullet 表示系统中所有满足 $\text{Pre}(p_j, t) \neq 0$ 的变迁的集合, 即 p_j 的输出变迁集合. $\bullet p_j$ 表示系统中所有满足 $\text{Post}(t, p_j) \neq 0$ 的

变迁的集合,即 p_j 的输入变迁集合. 标识是 n 维的列向量 m ,表示每一个库所中有着非负的托肯数量,其中托肯用黑色的圆点表示. 第 i 维库所 p_i 内的托肯数记为 $m(p_i)$,初始标识表示为 m_0 .

给定一个当前状态下的标识 m ,当且仅当 $m \geq \text{Pre}(\cdot, t)$ 时,变迁 t 在标识 m 下是使能的,记为 $m[t]$. 变迁 t 激发后,产生了新的标识 m' ,且满足: $m' = m + C(\cdot, t)$. Petri网中所有的变迁序列构成的集合称作序列集,记为 T^* . 给定一个变迁序列 $\sigma \in T^*$,如果 σ 在标识 m 下是使能的,则记为 $m[\sigma]$,激发后系统到达标识 m' ,记为 $m'[\sigma]m$. 如果变迁序列 $\sigma = t_1, t_2, \dots, t_s$,则称 $t_1, t_2, \dots, t_s \in \sigma$. 一个标识 m 称为从初始标识 m_0 可达的,其满足存在一个变迁序列 σ ,使 $m_0[\sigma]m$.

给定一个Petri网 N ,一个标签Petri网被定义为 $N_l = (N, E, L)$,其中:

- 1) E 是标记的集合,标记是一个字母;
- 2) L 是一个标记函数,满足 $L : T \rightarrow E \cup \{\varepsilon\}$,其中每一个变迁的标记为一个字母或者一个空字符串 ε .

变迁集 $T = T_o \cup T_u$. 其中: T_o 为可观变迁集合,可观变迁用实体黑色矩形表示; T_u 为不可观变迁集合,不可观变迁用空心黑色矩形表示. 标记为空字符串 ε 的变迁是不可观测的变迁,记为 t_u ,满足 $t_u \in T_u, L(t_u) = \varepsilon$. 标签Petri网模型中的其他变迁是可观的,记为 t_o ,满足 $t_o \in T_o$,标记为属于 E 中的一个字母. 当可观的变迁激发时,其标记是可以观测的. 特别的,若其中两个可观变迁具有相同的标记,则其称为不可分辨的变迁. 不可分辨的变迁集合为 T_l ,其中 l 是相同的标记. 在一个标签Petri网模型中,给定一个激发的变迁序列 $\sigma = t_1, t_2, \dots, t_k$,观测到事件序列为 $L(\sigma) = L(t_1), L(t_2), \dots, L(t_k)$,其中最后一个可观事件的标记为 $\omega = L(t_k)$,以及最后一个可观事件记为 $t_k = L^{-1}(\omega)$.

给定两个Petri网系统: $N_1 = (P_1, T_1, \text{Pre}_1, \text{Post}_1)$ 和 $N_2 = (P_2, T_2, \text{Pre}_2, \text{Post}_2)$,网 N_2 称为网 N_1 的 T' -诱导子网. 如果 N_1 和 N_2 满足:1) $P_1 \in P_2$;2) $T_1 \in T_2$;3) $\text{Pre}_1 = \text{Pre}_2 : P_1 \times T_2$;4) $\text{Post}_1 = \text{Post}_2 : T_1 \times P_2$. 则网 N_2 的初始标识满足: $m_{02} = m_{01}(p_2)$.

给定一个标签Petri网系统 $\langle N_l, m_0 \rangle$,变迁和库所由有向弧交替连接构成一条路径,记为 $\pi^{[21]}$. 用路径的起始结点 π^b ,终止结点 π^e 以及中间的结点 n 表示路径 π ,记为 (π^b, n, π^e) .

2 路径信息

在本节中,考虑到标签Petri网中网结构的复杂性,因此在故障诊断过程之前提出一些网结构的转化规则.

2.1 网结构转化规则

Petri网的基本结构有6种,如图1所示. 在以往文献中,基于这些结构的多种Petri网的转化规则已经提出^[22-25]. 针对标签Petri网提出了一些简单的网结构转化规则,并且还可以保持原始Petri网的故障可诊断属性.

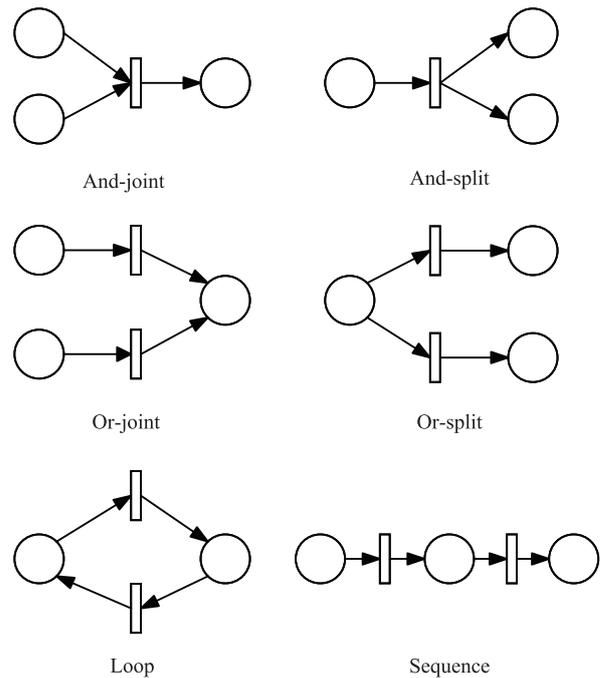


图1 6种基本网结构

1) 垂直向库所的融合.

如果在两个库所 p_i 与 p_j 之间存在一个变迁 ε ,则该变迁是正常且不可观测的,其拥有唯一的输入库所和唯一的输出库所. 该变迁可以被忽略,其输入库所和输出库所可以合并为一个新的库所. 得到的新库所的托肯数是输入库所与输出库所托肯数之和,即 $m(p) = m(p_i) + m(p_j)$.

2) 水平向变迁的融合.

如果存在若干个变迁 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$,它们拥有相同且唯一的输入库所和输出库所,且它们均为正常且不可观测的变迁,则这些变迁可以合并为一个正常且不可观测的变迁 ε . 融合后的Petri网系统的初始标识保持不变.

3) 水平向库所的融合.

如果存在若干个库所 p_1, p_2, \dots, p_i ,它们拥有相同且唯一的输入变迁和输出变迁,则这些库所可以合并为一个库所 p . 在融合后的Petri网系统中, $m(p) =$

$$\min\{m(p_1), m(p_2), \dots, m(p_i)\}.$$

4) 变迁标记的转化.

如果存在若干个变迁拥有相同的标记 l ,则拥有该标记的这些变迁将其标记分别转化为 l_1, l_2, \dots, l_n ,其中 n 为拥有相同标记 l 的变迁个数.

定义1 给定一个标签Petri系统 N_l ,在其中使用网结构转化规则,得到一个新的Petri网系统,该Petri网系统称为 N_l 的转化Petri网系统,记为 N_t .

例1 考虑一个通信协议的标签Petri网模型,如图2所示^[14]. 信息被变迁 t_1 分置在两个数据包中,通过上下两个通道(库所 p_2 和 p_3)传送. 两个数据包最终会合并,并向发送方发送确认(变迁 t_7). 在该Petri网模型中,标记集合为 $l = \{a, b\}$. 利用网结构转化规则可以得到转化Petri网模型如图3所示.

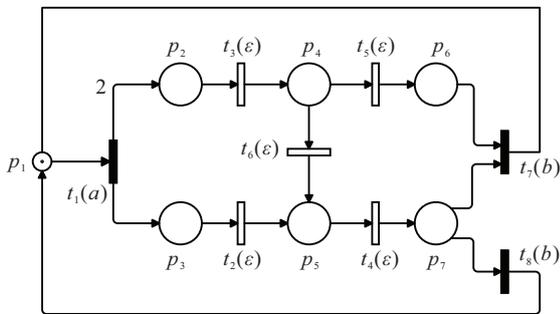


图2 通信协议的标签Petri网模型

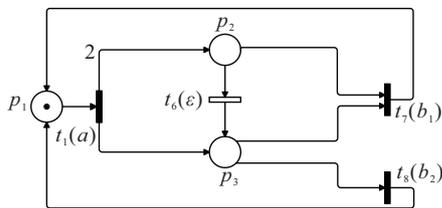


图3 通信协议的转化Petri网模型

命题1 网结构转化规则使用后,转化后的Petri网的故障可诊断性与原始Petri网保持一致.

证明 若原始的带标签Petri网是不可诊断的,且故障存在于不可观变迁上,则存在两个变迁序列标记为 σ_1 和 σ_2 ,其中 σ_1 和 σ_2 的可观部分相同. 假设故障变迁存在于标记为 σ_1 的序列中,不存在于标记为 σ_2 的序列中. 当故障变迁激发时,标记为 σ_2 的变迁序列可以是无限长度. 让一个正常且不可观的变迁 ε 包含在标记为 σ_1 的序列(或者标记为 σ_2 的序列)中,利用网转化规则,变迁 ε 可以被消除,但是消除后的标记为 σ_1^* (或者 σ_2^*)的序列的可观部分仍然保持不变. 因此,假设故障变迁存在于标记为 σ_1^* 的序列中,不存在于标记为 σ_2^* 的序列中. 当故障变迁激发时,标记为 σ_2^* 的变迁序列仍然可以是无限长度,转化后的Petri网是不可诊断的,同原始带标签Petri网的可诊

断性保持一致. 若原始的带标签Petri网是不可诊断的,且故障存在于不可分辨的可观变迁上,则同样存在两个变迁序列标记为 σ_1 和 σ_2 ,其中 σ_1 和 σ_2 的可观部分相同. 假设故障变迁存在于标记为 σ_1 的序列中,不存在于标记为 σ_2 的序列中. 当故障变迁激发时,标记为 σ_2 的变迁序列可以是无限长度. 让一个正常且不可观的变迁 ε 包含在标记为 σ_1 的序列(或者标记为 σ_2 的序列)中,利用网转化规则,变迁 ε 可以被消除,但是标记为 σ_1^* (或者 σ_2^*)的序列的可观部分仍然保持不变. 因此,假设故障变迁存在于标记为 σ_1^* 的序列中,不存在于标记为 σ_2^* 的序列中. 当故障变迁激发时,标记为 σ_2^* 的变迁序列仍然可以是无限长度,转化后的Petri网是不可诊断的,同原始带标签Petri网的可诊断性保持一致. □

若原始带标签Petri网是可诊断的,则证明过程相同.

2.2 多种路径约束关系

将已经得到的转化Petri网的网结构分解成若干路径,接着将这些路径分类归为不同的集合,挖掘其中的约束关系,读取其中蕴含的故障信息.

定义2 在转化Petri网中给定一条路径 π ,若 π^b 和 π^e 均为可观变迁,且路径中剩余的变迁均为不可观变迁,则该路径称为一条可观路径,记为 π_o .

可观路径 π_o 中的起始结点用 π_o^b 表示,终止结点用 π_o^e 表示. 可观路径的集合用 Π_o 表示.

例2 考虑图3中的转化Petri网模型. 其中可观路径的集合 Π_o 包含了7条可观路径:路径①为 (t_1, p_2, t_7) ,路径②为 (t_1, p_3, t_7) ,路径③为 $(t_1, p_3, t_6, p_3, t_7)$,路径④为 $(t_1, p_2, t_6, p_3, t_8)$,路径⑤为 (t_1, p_3, t_8) ,路径⑥为 (t_7, p_1, t_1) ,路径⑦为 (t_8, p_1, t_1) .

定义3 在转化Petri网中给定一条可观路径 π_o 和一个观测到的激发事件序列 $L(\sigma)$,若 $L(\pi_o^b) \in L(\sigma)$,则称托肯可能流动进入可观路径 π_o .

定义4 在转化Petri网中给定一条可观路径 π_o 和一个观测到的激发事件序列 $L(\sigma)$,若 $L(\pi_o^b) \in L(\sigma), L(\pi_o^e) \in L(\sigma)$,则称托肯可能流动经过可观路径 π_o .

托肯流动进入和托肯流动经过路径是两种不同的情况. 当托肯流动进入路径时,此路径中的变迁可能激发. 当托肯流动经过路径时,此路径中的变迁一定激发.

定义5 在转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,若 $\pi_{o1}^b = \pi_{o2}^b$,则路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在独一性约束,记为 $\pi_{o1}(e)\pi_{o2}$.

例3 在图3的转化Petri网系统中,可观路径①

与⑤之间存在独一性约束关系。

定义6 给定一个标签Petri网 N_l ,若存在若干个变迁具有相同的标记 l ,则标记 l 称为转化Petri网 N_l 的一个标记集合。

定义7 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,若变迁 π_{o1}^b 和 π_{o2}^b 的标记属于相同的标记集合,则路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在平行性约束,记为 $\pi_{o1}(p)\pi_{o2}$ 。

例4 在图3的转化Petri网系统中,可观路径⑥与⑦之间存在平行性约束关系。

定义8 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,若变迁 π_{o1}^b 与 π_{o2}^b 拥有相同的输入库所,则路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在守恒性约束,记为 $\pi_{o1}(\text{con})\pi_{o2}$ 。

定义9 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,且 $\pi_{o1}(\text{con})\pi_{o2}$,若变迁 π_{o1}^b 和 π_{o2}^b 的输入库所中有且仅有一个托肯,则称路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在严格守恒性约束,记为 $\pi_{o1}(s, \text{con})\pi_{o2}$ 。

定义10 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,若存在一个库所 p 满足 $\{t_1, t_2\} \subseteq p^\bullet$,则称路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在竞争性约束。其中: t_1 是不可观变迁或者不可分辨变迁, t_2 是可分辨的可观变迁, $t \in \pi_{o1}$ 以及 $t_u \in \pi_{o2}$ 。

定义11 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,且 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在竞争性约束,若存在一个库所 p 满足 $m(p) = 1, \{t_1, t_2\} \subseteq p^\bullet$,则称路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在严格竞争性约束,记为 $\pi_{o1}(s, \text{com})\pi_{o2}$ 。其中: t_1 是不可观变迁或者不可分辨变迁, t_2 是可分辨的可观变迁, $t \in \pi_{o1}$ 以及 $t_u \in \pi_{o2}$ 。

定义12 在一个Petri网中给定一条路径 π ,在路径 π 中,结点 n_1 通过有向弧指向结点 n_2 ,称结点 n_2 是结点 n_1 的上-结点。

定义13 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,当其满足下面两个条件时,称路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在分裂性约束:

- 1) 路径 π_{o2} 中存在一个库所 p 和不可观变迁 t_u ,且 p 是 t_u 的上-结点;
- 2) 存在变迁 $t \in p^\bullet, t \in \pi_{o1}, t \notin \pi_{o2}$ 。

定义14 在一个转化Petri网中给定两条可观路径 π_{o1} 和 π_{o2} ,当其满足下面两个条件时,称路径 π_{o1} 与 π_{o2} 间存在严格分裂性约束,记为 $\pi_{o1}(s, s)\pi_{o2}$:

- 1) 路径 π_{o2} 中存在一个库所 p 和不可观变迁 t_u ,且 $m(p) = 1, p$ 是 t_u 的上-结点;
- 2) 存在变迁 $t \in p^\bullet, t \in \pi_{o1}, t \notin \pi_{o2}$ 。

在某些情况下,可观路径间的竞争性约束关系与分裂性约束关系会重合。

2.3 路径约束规则

根据定义3~定义14可以制定相应的路径间的约束规则。托肯流动进入路径用 $t \rightarrow \pi$ 表示。

规则1 给定两条可观路径 π_{o1} 和 $\pi_{o2}, \pi_{o1}(e)\pi_{o2}$,则托肯一定满足 $t \rightarrow \pi_{o1}, t \rightarrow \pi_{o2}$ 。

规则2 给定两条可观路径 π_{o1} 和 $\pi_{o2}, \pi_{o1}(p)\pi_{o2}$,它们的起始结点的标记属于标记集合 l 。若标记为 l 的可观变迁激发,则托肯可能满足 $t \rightarrow \pi_{o1}, t \rightarrow \pi_{o2}$ 。

规则3 给定两条可观路径 π_{o1} 和 $\pi_{o2}, \pi_{o1}(s, \text{con})\pi_{o2}$ 。若存在托肯满足 $t \rightarrow \pi_{o1}$,则托肯一定不满足 $t \rightarrow \pi_{o2}$ 。

规则4 给定两条可观路径 π_{o1} 和 $\pi_{o2}, \pi_{o1}(s, \text{com})\pi_{o2}$ 。若存在托肯满足 $t \rightarrow \pi_{o1}$,则托肯一定不满足 $t \rightarrow \pi_{o2}$ 。

规则5 给定两条可观路径 π_{o1} 和 $\pi_{o2}, \pi_{o1}(s, s)\pi_{o2}$ 。若存在托肯满足 $t \rightarrow \pi_{o1}$,则托肯一定不满足 $t \rightarrow \pi_{o2}$ 。

例5 考虑图3中的转化Petri网模型,给定一个可观的事件标记 $\omega = a$ 。托肯可能流动进入可观路径①,②,③,④,⑤。

更新可观变迁标记 $\omega = b$ 。托肯可能流动经过可观路径①,②,③,④,⑤。由于可观路径③和⑤具有严格分裂约束关系,同时②和④也具有严格分裂关系,托肯可能流动进入可观路径①和②或者④和⑤。

更新可观变迁标记 $\omega = b$ 。在未更新前的标识下,库所 p_3 中的托肯数为0,可观路径③和④具有严格分裂约束关系,托肯一定流动进入可观路径③和④。但是由于库所 p_2 中的托肯一定需要流入库所 p_3 中,托肯一定不会流动进入可观路径③。

3 故障诊断

本节中利用不同路径间的约束规则,在转化Petri网中给出故障诊断算法,针对故障为不可观变迁或者标记为相同的不可分辨的可观变迁,给出相应的故障诊断结果。

给定一个标签的Petri网,将其中的变迁分为两个可观变迁集合和不可观变迁集合 T_o 和 T_u 。其中可观变迁集合也可以分为两个子集 $T_{o,f}$ 和 $T_{o,reg}$,且满足下面两个条件:

- 1) 标签Petri网中正常且可观的变迁 $t \in T_{o,reg}$;
- 2) 标签Petri网中故障且可观的变迁 $t \in T_{o,f}$ 。

属于集合 $T_{o,f}$ 中的故障变迁同样也可能属于不

可分辨集合 T_l . 当标记 l 被观测到时, 故障变迁可能会被激发.

不可观变迁集合 T_u 代表的是标记为 ε 的变迁集合, 同样可以分为两个子集 $T_{u,f}$ 和 $T_{u,reg}$, 且满足下面两个条件:

- 1) 标签 Petri 网中正常且不可观的变迁 $t \in T_{u,reg}$;
- 2) 标签 Petri 网中故障且不可观的变迁 $t \in T_{u,f}$.

定义 15 在转化 Petri 网中给定一条可观路径 π_o , 当故障变迁 $t_f \in \pi_o$ 时, 其称为故障路径, 记为 π_f .

给定一条故障路径 $\pi_f \in \Pi_o$, 其满足可观路径的所有约束规则. Π_f 表示故障路径的集合.

定义 16 在转化 Petri 网中, 给定一个可观序列 σ , 其标记属于 E , 一个故障诊断器定义为 $\Delta: E \times T_f^i \rightarrow \{0, 1, 2\}, i = 1, 2, \dots, k$. 可观序列 σ 的最后一个标记为 ω , 该故障诊断器的诊断结果如下:

- 1) 当 $\Delta(\omega, t_f) = 0$ 时, Petri 网系统行为是正常的, 故障变迁 t_f 没有激发;
- 2) 当 $\Delta(\omega, t_f) = 1$ 时, Petri 网系统行为是含糊不清的, 故障变迁 t_f 可能激发;
- 3) 当 $\Delta(\omega, t_f) = 2$ 时, Petri 网系统行为是故障的, 故障变迁 t_f 一定激发.

定义 17 在一个转化 Petri 网中, 给定一个故障诊断器 $\Delta(\omega, t_f)$, 诊断器标记 Tag 值定义如下:

- 1) 当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为 0 和 2 时, Tag 的值为空字符;
- 2) 当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为 1 时, 故障路径不属于标记为 ω 的可观路径集合中, 且故障路径和其中的可观路径存在独一性约束, 此时 Tag 的值为 3;
- 3) 当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为 1 时, 故障路径不属于标记为 ω 的可观路径集合中, 且故障路径与其中的可观路径存在平行性约束, 此时 Tag 的值为 2;
- 4) 当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为 1 时, 故障路径不属于标记为 ω 的可观路径集合中, 且故障路径和其中的可观路径不存在严格守恒性平行性约束、严格竞争性约束、严格分裂性约束以及平行性约束, 此时 Tag 的值为 1.

当诊断器标记 Tag 的值不是空字符时, 标记为 ω 的可观路径的数量记为 n . 该变量 n 和诊断器标记 Tag 的值用于推断故障变迁 t_f 激发的概率大小.

算法 1 基于 Petri 网路径信息的故障诊断算法.

输入: 一个标签的 Petri 网 (N, m_0) , 一个可观测的事件标记 ω , 故障变迁 t_f ;

输出: 故障诊断器 $\Delta(\omega, t_f)$, Tag, n .

step 1: 基于转化网规则得到转化 Petri 网 (N_t, m_0) ;

step 2: 基于定义 2 得到可观路径集合 Π_o ;

step 3: 令 $m = m_0$;

step 4: 观测到一个标记序列 ω , 令 $m' = m + D(\cdot, L^{-1}(\omega))$ 以及 $m = m'$, Tag = ε , $n = 0$;

step 5: for 一个可观路径 $\pi_{oi} \in \Pi_o$, 存在 $L(\pi_{oi}^b$ or $\pi_{oi}^e) = \omega$, 令 Π_o 中可观路径 π_{oi} 数量为 n , do

1) if $L(\pi_{oi}^b) = \omega$, 用符号 * 标记 π_{oi}^b return

2) if $\pi_{oi} \in \Pi_f$ return

3) if 结点 π_{oi}^b 和 π_{oi}^e 均标记了符号 * return, 输出 $\Delta(\omega, t_f) = 2$, 转去 46);

4) else

5) if 存在一条可观路径 $\pi_{oj} \in \Pi_o$, 结点 π_{oj}^b 和 π_{oj}^e 均标记了符号 * return

6) if $\pi_{oi}(s, con)\pi_{oj}$ return, 转去 43);

7) else

8) if $\pi_{oi}(s, com)\pi_{oj}$ return, 转去 43);

9) else

10) if $\pi_{oi}(s, s)\pi_f$ return, 转去 43);

11) else

12) if $\pi_{oi}(p)\pi_f$ return, 转去 43);

13) else Tag=1, 输出 $\Delta(\omega, t_f) = 1$, 转去 46);

14) end if;

15) end if;

16) end if;

17) end if;

18) else 转去 12);

19) end if;

20) end if;

21) else 转去 6);

22) end if;

23) else π_{oi}^e 标记符号 *;

24) end if;

25) if $\pi_{oi}(s, con)\pi_{oj}$ return, 转去 43);

26) else

27) if $\pi_{oi}(s, com)\pi_{oj}$ return, 转去 43);

28) else

29) if $\pi_{oi}(s, s)\pi_{oj}$ return, 转去 43);

30) else 转去 step 4;

31) end if;

32) end if;

33) end if;

34) if $\pi_{oi}(p)\pi_{oj}$ return

35) if 结点 π_{oi}^b 和 π_{oi}^e 均标记了符号 * return, 转去 43);

```

36) else Tag=2, 输出  $\Delta(\omega, t_f) = 1$ , 转去46);
37) end if;
38) else
39) if  $\pi_{oi}(e)\pi_{oj}$  return Tag=3, 输出  $\Delta(\omega, t_f) = 1$ ,
转去46);
40) else 转去43);
41) end if;
42) end if;
43) 输出  $\Delta(\omega, t_f) = 0$ , 转去46);
44) end for;
45) 更新 $\omega$ ;
46) if  $\omega$  是一个新的可观标记, 转去 step 4;
47) else 结束算法;
48) end if.

```

考虑一个标签Petri网 N_t , 利用网结构转化规则, 可以得到其转化Petri网 N_t . 在转化Petri网中, 将其部分网结构分离出多条可观路径. 在这个可观路径集合中包含了故障路径 π_f . 当系统观测到一个可观变迁标记 ω 时, 证明至少有一条可观路径中有托肯流动进入, 此时该可观路径的起始结点或者终止结点需要被标记*. 同时后面的托肯流动存在很多种情况, 针对不同的情况需要进行不同的分析.

1) 其中一种情况是: 所有托肯流动进入的可观路径均不是故障路径.

① 这些可观路径与故障路径间存在如下的任意一种约束关系, 包含严格守恒性约束关系、严格竞争性关系、严格分裂性关系时, 托肯一定不会流动进入故障路径, 根据规则3~规则5, 此时故障变迁 t_f 一定不会激发.

② 存在另外一种情况, 当这些可观路径与故障路径间不满足上述的3种约束关系, 且其中一条起始结点和终止结点均被标记*的可观路径与故障路径间存在平行约束关系时, 故障变迁 t_f 若为不可观变迁, 故障变迁仍然有可能包含在上述可观路径中, 则故障变迁有可能被激发, 若故障变迁 t_f 为不可分辨变迁, 其一定不可能在上述可观路径中, 则 t_f 一定不激发.

2) 另外一种情况是: 所有托肯流动进入的可观路径中包含了故障路径.

① 若该故障路径的起始结点和终止结点均被标记*, 则该故障路径中一定有托肯流动经过, 故障变迁 t_f 一定激发.

② 若该故障路径的起始结点或者终止结点其中之一被标记*, 则接下来需要分为3种情况讨论.

a) 第1种情况, 若一条起始结点和终止结点均被标记的可观路径(非故障路径)与故障路径间存在如下的任一约束关系, 包含严格守恒性约束关系、严格竞争性关系、严格分裂性关系, 根据规则3~规则5, 则托肯一定不会流动进入故障路径, 此时故障变迁 t_f 一定不会激发.

b) 第2种情况, 若上述3种约束关系均不满足, 且该可观路径与故障路径间存在平行性约束关系, 则故障变迁 t_f 一定不激发.

c) 第3种情况, 除去上述4种约束情况, 故障变迁 t_f 均有可能激发.

③ 若该可观路径的起始结点和终止结点其一被标记*, 则故障变迁 t_f 均有可能激发.

在一个标签Petri网中给定一个可观的事件标记 ω . 遍历算法1一次, 每一个“if”条件需要判断运算一次, 算法中有15个“if”条件, 需要有15次自然数加法. 每经历一个“for”循环需要遍历一次算法, 算法中有1个“for”循环, 则“for”循环中的所有步数需要乘以循环的次数. 因此遍历一次算法1需要运算的最大步数为 $1+1+1+1+1 \times [(1+1+1+1+1+1+1) + (1+1+1) + (1+1) + 1] + 1 = 18$. 与传统的遍历系统状态空间的故障诊断方法相比, 算法1的计算复杂性从指数级 $O(2^n)$ 降低到多项式级 $O(n)$, 更加满足工程应用中实时性的要求.

算法1中得到的故障诊断器 $\Delta(\omega, t_f)$ 可以诊断故障变迁 t_f 的3种结果, 而对于 $\Delta(\omega, t_f) = 1$ 的情况, 仍然不能判断. 因此需要针对故障可能发生的状态, 给出具体发生托肯流动进入一条故障路径的概率值. 该故障概率值不能代表故障变迁激发的概率, 但是可以反映故障变迁 t_f 可能激发的概率大小.

算法2 计算托肯流动进入一条故障路径的概率值.

输入: 故障诊断器 $\Delta(\omega, t_f)$, Tag, n ;

输出: 概率值 $\hat{p}(\pi_f)$.

step 1: 观测到一个事件标记为 ω ;

step 2: if $\Delta(\omega, t_f) = 0$ return $\hat{p}(\pi_f) = 0$;

step 3: else

1) if $\Delta(\omega, t_f) = 2$ return $\hat{p}(\pi_f) = 1$;

2) else 转去 step 5;

3) end if;

step 4: end if;

step 5: if Tag = 3 return $\hat{p}(\pi_f) = \frac{1}{n+1}$;

step 6: else

1) if Tag = 2 return $\hat{p}(\pi_f) = \frac{1}{n+1}$;

2) else $\hat{p}(\pi_f) = \frac{1}{n}$;
 3) end if;
 step 7: end if.

在算法2中,有4个“if”条件,算法需要进行4次选择和判断,因此遍历一次算法2,最大的计算步数为 $1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 5$. 给定一个故障诊断器的诊断结果 $\Delta(\omega, t_f)$. 当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为0时, Tag 的值为空字符串,表示故障变迁一定不发生,托肯没有流动进入故障路径;当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为2时, Tag 的值仍然为空字符串,故障变迁一定发生,托肯流动经过故障路径;当 $\Delta(\omega, t_f)$ 的值为1时, Tag 的值不为空字符串,需要判断托肯流动进入故障路径的概率;当 Tag 记号为3时,表示故障路径不属于标记为 ω 的可观路径集合中,此类可观路径的数量为 n ,且故障路径和其中的可观路径存在独一性约束,因此托肯流动进入其中的概率为 $\hat{p}(\pi_f) = 1/(n + 1)$;当 Tag 记号为2时,表示故障路径不属于标记为 ω 的可观路径集合中,且故障路径和其中的可观路径存在平行性约束,因此托肯流动进入其中的概率也为 $\hat{p}(\pi_f) = 1/(n + 1)$;当 Tag 记号为1时,表示故障路径属于标记为 ω 的可观路径集合中,且故障路径和其中的可观路径不存在严格守恒性平行性约束、严格竞争性约束、严格分裂性约束以及平行性约束,因此托肯流动进入其中的概率为 $\hat{p}(\pi_f) = 1/n$. 最终托肯流动进入其所有的故障路径的概率值为 $P(\pi_f) = \hat{p}(\pi_{f1}) + \hat{p}(\pi_{f2}) + \dots + \hat{p}(\pi_{fi})$, 其中 i 为故障路径的数量.

例6 考虑图2所示的通信协议的标签Petri网系统. 当其中一个数据包错误地从上面通道进入下方通道时,称一个故障发生(变迁 t_6). 此时,会有一个故障超时信号发送到发送方(变迁 t_8),信息需要再次传输.

给定可观变迁标记为 $\omega = a$. 包含故障变迁 t_6 的可观路径为③和④,因此托肯流动进入故障路径的概率为 $2/5$. 同样,包含故障变迁的 t_8 且起始结点的标记不是 a 的可观路为④和⑤,因此托肯流动进入故障路径的概率为 $2/5$.

更新可观变迁标记为 $\omega = b$. 当组合为①和②时,故障变迁 t_6 的可观路径为③和④,因此托肯流动进入故障路径的概率为0. 当组合为④和⑤时,故障变迁 t_6 的可观路径为③和④,因此托肯流动进入故障路径④的概率为 $1/2$,最终托肯流动进入故障路径的概率为 $1/4$. 当组合为①和②时,故障变迁 t_8 的可观路径为④和⑤,因此托肯流动进入故障路径的概率

为0. 当组合为④和⑤时,故障变迁 t_8 的可观路径为④和⑤,因此托肯流动进入故障路径④和⑤的概率为1,最终托肯流动进入故障路径的概率为 $1/2$.

4 实例

图4是一个标签Petri网^[11],描述了一个处理损坏部件的零件生产线.

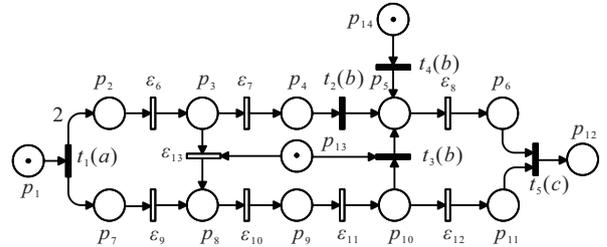


图4 零件处理过程的标签Petri网模型

库所 p_1 中有托肯表示该生产线系统已准备好处理损坏的部件. 变迁 t_1 将平板和板块分开,两个板块被送到两条不同的生产线上. 上面的生产线由库所 $p_2 \sim p_6$ 构成. 同时,下面的生产线由库所 $p_7 \sim p_{11}$ 构成. 通过两条线的零件加工,不可观测变迁 $\epsilon_6 \sim \epsilon_{12}$ 描述了打滑、清理、涂漆和抛光的过程. 最后,可观变迁 t_5 表示正确地将板块插入平板中. 在处理期间,如果一个板块从上面的生产线转移到下面的生产线 (ϵ_{13}) 或者平板从下面的生产线转移到上面的生产线 (t_3),则表示发生故障. 故障变迁的集合是 $T_f = \{\epsilon_{13}, t_3\}$.

转化Petri网模型中的可观路径和故障路径共计8条,如下所示:路径①为 $(t_1, p_2, \epsilon_{13}, p_3, t_3)$, 路径②为 $(t_1, p_2, \epsilon_{13}, p_3, t_5)$, 路径③为 (t_1, p_3, t_3) , 路径④为 (t_1, p_3, t_5) , 路径⑤为 (t_1, p_2, t_2) , 路径⑥为 (t_2, p_5, t_5) , 路径⑦为 (t_4, p_5, t_5) , 路径⑧为 (t_3, p_5, t_5) .

利用网结构转化规则,可以得到相应的转化Petri网模型,如图5所示. 其中故障路径为①,②,③,⑧. 可观路径①,②,③,④与⑤之间存在独一性约束关系. 可观路径⑥,⑦与⑧之间存在平行性约束关系. 可观路径②与⑤之间存在严格分裂性约束关系.

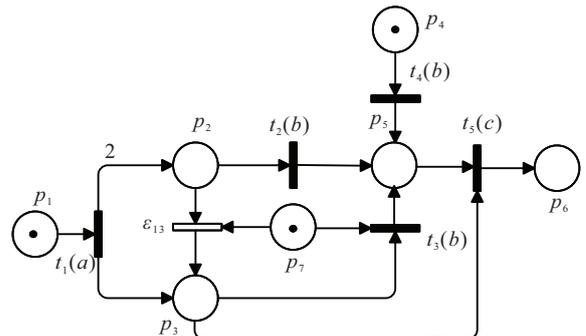


图5 零件处理过程的转化Petri网模型

给定一个可观变迁标记 $\omega = a$. 考虑到独一性约束, 托肯流动进入可观路径①, ②, ③, ④以及⑤. 可观路径①, ②, ③, ④以及⑤的起始结点标记符号*. 因此, 托肯流动进入可观路径①以及②, 由算法1可以得到 $\Delta(a, \varepsilon_{13}) = 1$, 故障变迁 ε_{13} 可能会激发, 托肯流动进入故障路径的概率为2/5. 但是, 由于标记 b 没有观测到, 故障路径③没有托肯流动经过, 故障路径⑧没有托肯流动进入, 因此 $\Delta(a, t_3) = 0$, 故障变迁 t_3 一定没有激发.

更新可观测的变迁标记 $\omega = b$. 可观路径①, ③, ⑤, ⑥, ⑦以及⑧具有标记 b . 可观路径①, ③以及⑤的终止结点标记了符号*, 可观路径⑥, ⑦以及⑧的起始结点标记了符号*. 由独一性约束和平行性约束可知, 托肯可能流动经过可观路径①, ③以及⑤. 因此托肯可能流动经过故障路径①和③, 故障变迁 ε_{13} 的故障路径为①和③, 托肯流动进入的概率为2/3. 故障变迁 t_3 的故障路径为③, 托肯流动进入的概率为1/3. 故障变迁 ε_{13} 和 t_3 均有可能激发.

更新可观测变迁标记 $\omega = b$. 托肯可能再一次流动经过可观路径①, ③以及⑤. 因此托肯可能流动经过故障路径①和③, 故障变迁 ε_{13} 的故障路径为①和③, 托肯流动进入的概率为2/3. 故障变迁 t_3 的故障路径为③, 托肯流动进入的概率为2/3. 考虑原始离散事件系统, 给定一个可观变迁标记 $\omega = b$, 则观测到的事件为 $t_1t_2t_3$ 、 $t_1t_2t_4$ 、 $t_1t_3t_2$ 、 $t_1t_3t_4$ 、 $t_1t_4t_2$ 或 $t_1t_4t_3$.

根据观测到的不同的事件序列可以计算出故障变迁 t_3 和 ε_{13} 激发的概率值, 如表1所示.

表1 不同可观事件序列 σ 的诊断结果

σ	$\Delta(a, \varepsilon_{13})$	$\Delta(a, t_3)$
a	1	0
ab	1	1
abb	1	1
$abbc$	1	0
$abbcc$	1	0

5 分析讨论

在这一部分中, 假设在转化后的Petri网中不存在任意长的不可观变迁序列, 确保了基于路径约束信息的故障诊断器可以构建成功.

将该故障诊断方法的计算复杂度分为两个步骤分析: 第1步是使用网结构转化规则将原始标签Petri网转化为转化Petri网. 在此过程中, 需要保持标签Petri网的可诊断属性. 此外, 通过网结构转化规则的使用, 转化后的Petri网中的结点数量减少, 即一些没有蕴含故障信息的变迁和库所可以合并. 因此, 故障

的诊断过程可以在更加紧凑的系统状态空间中进行, 并且诊断过程的计算复杂性也会随之降低. 在第2步中, 考虑通过分离转化后的Petri网的网结构, 得到若干条可观路径, 这些可观路径实际是转化Petri网的部分子网. 基于这些可观路径之间多种约束关系以及托肯在路径中的流动情况, 制定相应的约束规则. 在这项工作中, 故障诊断问题需要考虑的元素单位是路径而不是Petri网的结点或标识, 由于路径的数量远小于需要考虑的结点数或者标识数, 可以进一步降低故障诊断程序的计算复杂性.

将基于路径信息的故障诊断方法与基于可达性图和基础标记的故障诊断方法进行比较. 该方法最好的优点是无需遍历系统的所有状态, 也不会涉及系统结构的大规模化. 考虑上节中生产线实例所构建的标签Petri网模型, 只需要在部分状态空间中搜索故障行为. 同时, 网结构转化规则可以削减系统的一部分规模, 计算复杂性得到进一步的分散和降低, 这将满足大规模系统要求.

6 结论

本文研究了模型为标签Petri网的离散事件系统的故障诊断问题, 其中假设故障是不可观变迁或者是标记相同的不可分辨变迁. 本文提出的故障诊断方法基于路径约束信息得到. 得益于标签Petri网中的网结构转化规则, 故障诊断程序可以在一个更加紧凑的系统状态空间中执行. 与在常规的搜索系统整个状态空间的故障诊断方法相比, 本方法的主要贡献是降低了故障诊断的计算复杂性. 本文的核心思想是挖掘可观路径之间多种约束关系, 并结合托肯在路径中的流动情况, 制定相应的路径约束规则, 从而得出故障诊断的不同结果, 并针对其中不确定的情况, 给出故障变迁可能激发的概率大小.

参考文献(References)

- [1] 李晗, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(1): 1-19.
(Li H, Xiao D Y. Survey on data driven fault diagnosis methods[J]. Control and Decision, 2011, 26(1): 1-19.)
- [2] Isermann R. Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey[J]. Automatica, 1984, 20(4): 387-404.
- [3] 刘浩然, 马明, 李世昭, 等. 一种应用于故障诊断中的高效推理算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(11): 2033-2040.
(Liu H R, Ma M, Li S Z, et al. An effective inference algorithm for fault diagnosis[J]. Control and Decision,

- 2015, 30(11): 2033-2040.)
- [4] Rigatos G G. Fault detection and isolation based on fuzzy automata[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(12): 1893-1902.
- [5] Philips P, Ramkumar K B, Lim K W, et al. Automaton-based fault detection and isolation[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, 23(1): 215-218.
- [6] Zad S H, Kwong R H, Wonham W M. Fault diagnosis in timed discrete-event systems[C]. *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision Control*. Phoenix: IEEE, 1999, 1756-1761.
- [7] Lin F. Diagnosability of discrete event systems and its applications[J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 1994, 4(2): 197-212.
- [8] Xiang X, Lafortune S. On the decidability and complexity of diagnosability for labeled Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(11): 5931-5938.
- [9] Basile F, Cabasino M P, Seatzu C. Diagnosability analysis of labeled time Petri net systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(3): 1384-1396.
- [10] Ramirez-Trevino A, Ruiz-Beltrán E, Rivera-Rangel I, et al. Online fault diagnosis of discrete event systems. A Petri net-based approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Science and Engineering*, 2007, 4(1): 31-39.
- [11] Cabasino M P, Giua A, Seatzu C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions[J]. *Automatica*, 2010, 46(9): 1531-1539.
- [12] Cabasino M P, Giua A, Seatzu C. Diagnosis using labeled Petri nets with silent or undistinguishable fault events[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic: Systems*, 2013, 43(2): 345-355.
- [13] Jiroveanu G, Boel R K, Bordbar B. On-line monitoring of large Petri net models under partial observation[J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2008, 18(3): 323-354.
- [14] Ru Y, Hadjicostis C N. Fault diagnosis in discrete event system modeled by partially observed Petri nets[J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2009, 19(4): 551-575.
- [15] Dotoli M, Fanti M P, Mangini A M. On-line fault detection in discrete event systems by Petri nets and integer linear programming[J]. *Automatica*, 2009, 45(11): 2665-2672.
- [16] Genc S, Lafortune S. Distributed diagnosis of discrete-event systems using Petri nets[J]. *International Conference Applications and Theory of Petri Nets*, 2003, DOI: 10.1007/13-540-44919-121.
- [17] Lefevre D. Fault diagnosis and prognosis with partially observed Petri nets[J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetic: Systems*, 2014, 44(10): 1413-1424.
- [18] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S, et al. Diagnosability of discrete event systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(9): 1555-1575.
- [19] Baroni P, Lamperti G, Pogliano P, et al. Diagnosis of a class of distribute discrete-event systems[J]. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetic: Systems and Humans*, 2000, 30(6): 731-752.
- [20] Benveniste A, Fabre E, Haar S. Diagnosis of asynchronous discrete event systems: A net unfolding approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(5): 714-727.
- [21] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(4): 541-580.
- [22] Luo J L, Wu W M, Su H Y. Supervisor synthesis for enforcing a class of generalized mutual exclusion constrains on Petri nets[J]. *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetic, Part A: Systems and Humans*, 2009, 39(6): 1237-1246.
- [23] Verbeek H M W, Wynn M T, Van der Aalst W M P, et al. Reduction rules for reset/inhibitor nets[J]. *Journal of Computer and Systems Sciences*, 2010, 76(2): 125-143.
- [24] Han Z D, Li J F. Reduction method for reachability analysis of Petri nets[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2003, 8(2): 231-235.
- [25] Ben L, Manel K B, Armand T. Diagnosis and diagnosability analysis of labeled Petri nets using reduction rules[C]. *The 13th International Workshop on Discrete Event Systems*. Xi'an: IEEE, 2016: 171-176.

作者简介

叶丹丹(1991—),女,博士生,从事离散事件系统、Petri网理论、故障诊断、自动化码头自动驾驶车的路径规划系统的研究, E-mail: 11532024@zju.edu.cn;

吴维敏(1970—),男,教授,博士生导师,从事Petri网理论和应用以及监督控制理论、离散事件系统、自动化码头、智能驾驶等研究, E-mail: wmwu@zju.edu.cn;

苏宏业(1969—),男,教授,博士生导师,从事鲁棒系统、非线性系统、时滞系统、离散事件系统和先进过程控制理论和应用等研究, E-mail: hysu@iipc.zju.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)