

利用 Petri 网特征结构的故障诊断方法

叶丹丹, 罗继亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决大规模复杂系统故障诊断中计算复杂性高的问题,提出一种基于 Petri 网的在线故障诊断方法. 首先,建立诊断对象的规范 Petri 网模型;其次,提出模型的严格最小库所不变量和特征库所不变量集合,并借助特征库所不变量集合描述 Petri 网模型的结构信息;最后,基于特征库所不变量集合提出任意当前标识的故障函数,并利用故障诊断函数完成故障识别和定位. 结果表明:该故障诊断方法采用了系统结构信息,无需遍历系统状态空间,具有多项式级的计算复杂性,能够满足实时性要求.

关键词: 故障诊断; Petri 网; 库所不变量; 故障函数

中图分类号: TP 277

文献标志码: A

由于 Petri 网是直观的图形化的语言,而且存在建模效率高的优点,因此近几年被广泛应用于离散事件系统的故障诊断中^[1-5]. Giua 等^[6]提出了基于基础标识和判断数来分析事件序列中的故障信息. Genc 等^[7]给出了基于有界 Petri 网的分布式故障诊断方法. Lefebvre 等^[8]构建了一个最小诊断器用来立即检测和隔离故障. Ru 等^[9]提出了将给定的部分可观的 Petri 网转化为等价的有标签的 Petri 网,通过库所和变迁的观测器,计算出故障变迁发生的置信度. Cabasino 等^[10]将基础标识的方法应用到制造业系统中,通过对比基础可达诊断器和可达集合,验证了此方法运算复杂度低的问题. Cabasino 等^[11]利用基础标识的方法,将故障变迁推广到不可观变迁及带有相同标签的不可分辨可观变迁. 郑永煌等^[12]针对一个液体火箭发动机启动过程的故障诊断,提出了针对实时 Petri 网的诊断方法. Hashizume 等^[13]提出利用 Petri 网中的库所不变量来寻找系统故障的方法. 本文在分析文献方法中的计算效率低、故障诊断不及时、故障定位模糊等缺点后,提出了基于 Petri 网特征结构的故障诊断方法.

1 基本概念和定义

Petri 网结构表示为 $N=(P, T, \text{Pre Post})$. 其中: P 是库所的集合, $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; T 是变迁的集合, $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$; $\text{Pre}: P \times T \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ 是前向关联矩阵, 定义了从库所到变迁的有向弧的权值; $\text{Post}: T \times P \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ 是后向关联矩阵, 定义了从变迁到库所的有向弧的权值. 标识是 n 维的列向量 m , 其元素 $m(j)$ 是第 j 个库所的托肯数目. m_0 是系统的初始标识, 变迁 t_j 可表示为一个 m 维向量 δ_j , 其第 j 分量等于 1. 当 t_j 发生后, 系统到达新标识 $m' = m + D \cdot \delta_j$. 其中: $D = \text{Post} - \text{Pre}$ 称为关联矩阵; 变迁序列表示为 δ , 也可以描述为一个激发向量 δ , 其各分量等于相应变迁在 δ 中出现的次数.

在一个 Petri 网结构里, 存在一个向量 $y: P \rightarrow \mathbf{Z}$. 如果 $y \geq 0$, 并且 $y \cdot D = 0$, 可以得到

$$y \cdot m = y \cdot m_0. \tag{1}$$

整个系统若是可以正常运行, 则标识 m 要满足方程(1).

收稿日期: 2013-10-22

通信作者: 罗继亮(1977-), 男, 副教授, 主要从事离散事件系统监控理论和 Petri 网理论与应用的研究. E-mail: jlluo@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家青年自然科学基金资助项目(60904018); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01339); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(11FJRC01); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA10004); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JB-SJ1006)

定义 1 设 R 为集合 S 上的一个关系,则集合 $\{x \in S | (x, y) \in R, \text{至少一个 } y \in S\}$ 称为 R 的支集,记做 $\text{Supp } R$,则 $\text{Supp } y = \{p \in P | y(p) \neq 0\}$.

定义 2 Petri 网结构里的一个库所不变量 y ,若不存在另一个库所不变量 $y' \neq y$,使得 $\text{Supp } y' \subset \text{Supp } y$,则该库所不变量 y 为最小库所不变量.

定义 3 如果最小库所不变量 y 中各元素的最大公约数为 1,那么 y 称为严格最小库所不变量. y_1 就是严格最小库所不变量,而 y_2, y_3 不是严格最小库所不变量.

定义 4 在一个 Petri 网结构里,如果 Y 是严格最小库所不变量组成的集合,并且其中元素是库所不变量的最大线性无关组,那么 Y 称为特征库所不变量集.

特征库所不变量集 Y 蕴含 Petri 网结构的系统信息,即 Petri 网中所有库所不变量可由该集中元素线性表示,它表征了由严格最小库所不变量为基底向量所构成的空间.若系统可以正常运行,则系统 Petri 网结构中所有库所间的关系须包含于该空间内.

定义 5 在一个 Petri 网结构里, Y 是一个特征库所不变量集.设 Y 内包含 k 个元素,那么标识 m 的故障矩阵定义为 $k \times n$ 维的矩阵 $T(m)$,它需要满足下列条件

$$T(m)_{i,j} = \begin{cases} 1, & y_i \cdot m \neq y_i \cdot m_0 \wedge y_i(p_j) \neq 0, & 1 \leq i \leq k, \quad 1 \leq j \leq n, \\ 0, & y_i(p_j) = 0, & 1 \leq i \leq k, \quad 1 \leq j \leq n, \\ -1, & y_i \cdot m = y_i \cdot m_0 \wedge y_i(p_j) \neq 0, & 1 \leq i \leq k, \quad 1 \leq j \leq n. \end{cases}$$

从严格最小库所不变量 y_i 中,可以获取非零列(j 列)所对应的库所 p_j 所携带的系统信息.若在任意当前标识 m 下,库所间关系不满足严格最小库所不变量 y_i ,则在该 y_i 中携带系统信息的库所 p_j 可能存在故障,记其 $T(m)_{i,j}$ 为 1;同理,若库所间关系满足严格最小库所不变量 y_i ,则该 y_i 中携带系统信息的库所 p_j 无故障,记其 $T(m)_{i,j}$ 为 -1;而 y_i 中零列,即不体现系统信息的库所 p_j 的故障情况未知,记其 $T(m)_{i,j}$ 为 0.

定义 6 在一个 Petri 网结构中,定义一个函数 f ,若对于 $\forall p_j \in P$,有 $f(p_j) = \sum_{i=1}^k T_{i,j}, j = 1, 2, \dots, n$,则称函数 f 为库所的故障函数.

故障函数表征了系统的故障信息,即各个库所发生故障概率的相对大小,某一个 p_j 库所的故障函数 f 越大,则其发生故障的可能性越高.在诊断故障的过程中,计算出每个库所的故障函数,取其中最大值,也就是故障最有可能发生的库所,这样就可以锁定故障范围了.

2 故障诊断算法及其分析

输入:Petri 网 N, m_0 和任意当前标识 m ;输出:故障概率最大的结点(库所).

步骤 1 求出 Petri 网 N 的关联矩阵 D ;

步骤 2 利用方程(1),计算一个特征库所不变量集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}, k \in \mathbf{Z}^+$;

步骤 3 判断 $y_i \cdot m = y_i \cdot m_0, i = 1, 2, \dots, k$,等式是否成立;如果上述等式均成立,则没有故障发生,算法退出;否则,执行下一步;

步骤 4 根据定义 5,计算故障矩阵 $T(m)$;

步骤 5 根据 $T(m)$ 和定义 6,计算故障函数 λ_m ;

步骤 6 比较 n 个库所的故障函数 $\lambda_m(p_j)$,选出最大的 $\lambda_m(p_j)$,则故障出现在第 j 个库所的概率最大,退出算法.

在算法中,根据给定的系统 Petri 网的模型,首先可以求得该 Petri 网的关联矩阵 D .如果当前标识 m 可以从初始标识 m_0 到达,则其必须满足 $m = m_0 + D \cdot \delta$.在式子的两边同时右乘 n 维的矩阵 y ,可以得到 $y \cdot m = y \cdot m_0 + y \cdot D \cdot \delta$.当 $y \cdot D = 0$ 时,即 $y \cdot m = y \cdot m_0$,对于任何从初始标识 m_0 开始可达的标识 m 都满足托肯的总数是不变量;如果 Petri 网模型代表的是一个正常运行的系统,则对于任何可达的当前标识 m 都满足约束条件 $y \cdot m = y \cdot m_0$.通过方程 $y \cdot D = 0$ 去寻找库所不变量 y .

解这个齐次方程,利用该方程的基础解系,可以表示空间中满足该约束的任意库所不变量 y ,用一个集合表示基础解系,即特征库所不变量集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}, k \in \mathbf{Z}^+$.在这个集合中,每一个元素都需

分别选取 $[y_1, y_2, y_5, y_7]$ 为 $[1, 0, 0, 0], [0, 1, 0, 0], [0, 0, 1, 0]$ 和 $[0, 0, 0, 1]$, 代入求解严格最小库所不变量 y 的方程组

$$\left. \begin{aligned} -y_1 + y_3 &= 0, & -y_2 + y_4 &= 0, & -y_3 - y_4 - y_5 + y_6 + y_7 &= 0, \\ -y_7 + y_8 &= 0, & -y_7 + y_9 &= 0, & -y_8 - y_9 + y_{10} &= 0, \\ -y_{10} + y_{11} &= -y_0 + y_1 + y_2 &= 0, \end{aligned} \right\}$$

(2)

可得到一组基础解系, 即 $\xi_1 = [1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0], \xi_2 = [1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0], \xi_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0], \xi_4 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 1, 1, 2, 2]$. 令 $y_1 = \xi_1, y_2 = \xi_2, y_3 = \xi_3, y_4 = \xi_4$, 得到一个特征库所不变量集

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}.$$

其中: 4 个严格最小库所不变量为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}.$$

给定一个当前

标识 $m' = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 带入方程(1)中, 容易得到

$$\begin{cases} y_1 \cdot m' \neq y_1 \cdot m_0, & y_2 \cdot m' \neq y_2 \cdot m_0, \\ y_3 \cdot m' \neq y_3 \cdot m_0, & y_4 \cdot m' \neq y_4 \cdot m_0. \end{cases}$$

因此, 当前标识 m' 对应的故障矩阵为

$$T(m') = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

则相应的故障函数为 $\lambda(p_0) = \sum_{i=1}^4 T_{i,0} = 2$; 同理可得, $\lambda(p_1) = 1, \lambda(p_2) = 1, \lambda(p_3) = 1, \lambda(p_4) = 1, \lambda(p_5) = 1, \lambda(p_6) = 4, \lambda(p_7) = \lambda(p_8) = \lambda(p_9) = \lambda(p_{10}) = \lambda(p_{11}) = 1$. 比较发现 $\lambda(p_6)$ 取值最大, 则故障发生库所 $\lambda(p_6)$ 处的概率最大.

下面需要验证实例的正确性. 首先根据给定的 Petri 网模型, 可以得到该 Petri 网系统的可达图, 如图 2 所示. 在图 2 中可以看到: 任意当前标识下, 库所 p_5 和 p_6 中是不可能同时存在托肯的; 同样从火箭启动的过程中看到, 只有当燃烧剂到达预燃室、氧化剂到达预燃室以及涡轮泵准备就绪时, 托肯才有可能到达涡轮泵测速状态, 与可达图相符. 在给定的当前标识 $m' = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 下, 库所 p_5 和 p_6 中同时存在托肯, 并且库所 p_1 和 p_2 中也存在托肯. 从图 2 可以看出: 当 p_1 和 p_2 中存在托肯时, 库所 p_5 中必然存在托肯, 所以最大可能是库所 p_6 违背了可达图的演化规则, 即 p_6 中出现故障的概率最大, 这也验证了算法的正确性.

4 结束语

在分析文献方法中的计算效率低、故障诊断不及时、故障定位模糊等缺点后, 提出了基于 Petri 网特征结构的故障诊断方法. 给出了特征库所不变量集的定义, 提出了故障矩阵和故障函数的概念, 并利用数学计算来进行故障定位. 该方法使得故障诊断更加快速, 故障定位更加精确, 由于是多项式级的计算复杂度, 同样利于工程应用.

参考文献:

[1] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, et al. Diagnosability of discrete-event systems[J]. IEEE Transac-

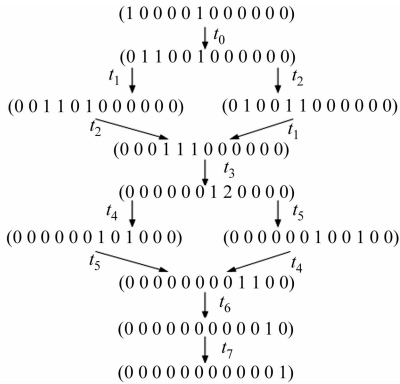


图 2 液体火箭发动机启动过程的 Petri 网可达图
Fig. 2 Reachable graph of the starting process of liquid propellant rocket engine in Petri nets

- tions on Automation Control, 1995, 40(9): 1555-1575.
- [2] MOSTERMAN P J. Diagnosis of physical systems with hybrid models using parameterized causality[C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control. London: Springer-Verlag, 2001: 447-458.
- [3] ASHLEY J, HOLLOWAY L E. Qualitative diagnosis of condition systems[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2004, 14(4): 395-412.
- [4] HADJICOSTIS C N, VERGHESE G C. Monitoring discrete event systems using Petri net embeddings[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1999, 1639(1): 188-208.
- [5] CABASINO M P, GIUA A, LAFIRTYBE S, et al. Diagnosability analysis of unbounded Petri nets[C]// Proceeding of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Shanghai: IEEE Press, 2009: 1267-1272.
- [6] GIUA A, SEATZU C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobserved transitions[C]// Proceeding of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville: IEEE Press, 2005: 6323-6328.
- [7] GENC S, LAFORTUNE S. Distributed diagnosis of place-bordered Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 206-219.
- [8] LEFEBVRE D, DELHERM C. Diagnosis of EDS with Petri net models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(1): 114-118.
- [9] YU R, 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.
- [10] CABASINO M P, GIUA A, POCCI M, et al. Discrete event diagnosis using labeled Petri nets: An application to manufacturing systems[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(9): 989-1001.
- [11] CABASINO M P, GIUA A, SEATZU C. Diagnosis using labeled Petri nets with silent or undistinguishable fault event[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2013, 43(2): 345-355.
- [12] 郑永煌, 田锋, 李人厚, 等. 基于 Petri 网的液体火箭发动机启动过程实时在线故障诊断方法[J]. 信息与控制, 2010, 39(2): 207-211.
- [13] HASHIZUME S, YAJIMA T, KUWASHITA Y, et al. Integration of fault analysis and interlock controller synthesis for batch process[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(1): 57-61.

Method for Fault Diagnosis Using Characteristic Structure of Petri Nets

YE Dan-dan, LUO Ji-liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: For fault diagnosis in large complex systems, a on-line fault diagnose method is proposed to solve the problem of high computational complexity. First, modeled a Petri net model. Secondly, proposed the strict minimal place-invariant and the set of characteristic place-invariant, so that might describe the structure information of Petri net model. Finally, based on the set of characteristic place-invariants, the failure function for any current marking is proposed. And then, utilized this failure function to diagnose and locate the faults. The result shows that this fault diagnosis method with the structure information dose not need traverse all states space of system. Furthermore, this method is with the computational complexity of polynomial, which makes this method meet the real time requirements.

Keywords: fault diagnosis; Petri nets; place-invariant; failure function

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)