

# 基于 Petri 网的故障诊断研究理论的综述

方 欢 方贤文 李德权

(安徽理工大学理学院 淮南 232001)

**摘 要** 故障诊断是离散事件系统中一项重要的研究内容,对于保障系统安全具有积极意义。基于 Petri 网的故障诊断相关研究主要分为故障可诊断性研究以及故障诊断器的构造理论研究,故障可诊断性又可以进一步分为一般可诊断性与  $K$ -可诊断性,而故障诊断器的设计方法又可以按照适用系统类型进一步分类。综述了故障诊断理论中可诊断性、 $K$ -可诊断性的各类研究方法和研究结论,介绍了离散 Petri 网系统、连续 Petri 网系统和分布式 Petri 网系统中故障诊断器的设计方法,并对各类方法的特点进行了重点分析。最后,给出了基于 Petri 网的故障诊断进一步研究的方向与应用难点,其对今后研究有一定的指导意义。

**关键词** 故障诊断, Petri 网, 可诊断性, 故障诊断器, 离散事件系统

**中图法分类号** TP301 **文献标识码** A

## Review on Fault Diagnosis Theory and Application Based on Petri Nets

FANG Huan FANG Xian-wen LI De-quan

(College of Science, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract** Fault diagnosis is an important research aspect in the area of discrete event system, which has great value to ensuring the safety of systems. Research on fault diagnosis based on Petri nets can be mainly divided into two classes, which are the study on diagnosability theory and the study on the theory of fault diagnoser constructing algorithm. Similarly, the diagnosability research can be divided into two aspects: diagnosability and  $K$ -diagnosability, while fault diagnoser constructing algorithm can also be further classified according to applying systems. Various study methods and conclusions for diagnosability and  $K$ -diagnosability of fault diagnosis were reviewed, and the constructing methods of fault diagnoser in discrete Petri nets systems, continuous Petri nets systems and distributed Petri net systems were introduced, and their characteristics were analyzed in detail. Finally, the research directions and application problems for further study were discussed, which can provide directive significance.

**Keywords** Fault diagnosis, Petri nets, Diagnosability, Fault diagnoser, Discrete event system

故障检测与诊断对保证现代工业,特别是对生产安全要求严格的生产企业具有重大意义。自 20 世纪 90 年代 Sampath 等人提出故障诊断的概念以来<sup>[1,2]</sup>,故障检测与诊断理论与方法受到了科学工作者的广泛重视,在离散事件系统的研究范畴内取得了比较完善的研究结论,如针对有界网和无界网系统的故障诊断方法研究,以及故障可诊断性的理论研究都取得了一系列的研究成果,这些研究结论将在后文详细阐述。在相关的研究方法中,以自动机与形式语言、Petri 网以及整数线性规划最为常见。本文以离散事件系统中的故障诊断为研究对象,分别以故障诊断的可诊断性研究以及基于 Petri 网的故障诊断方法在离散系统、连续系统以及分布式系统中的应用研究为主线,综述故障诊断理论与方法的研究成果,对已经取得的研究成果进行分析与比较,得出研究结论并分析未来可能的研究方向。

本文综述了基于 Petri 网的故障可诊断性,以及在线故障诊断器构造的相关研究理论成果,并对各种研究方法和取得

的结果进行综述,最后对进一步研究和应用的方向与难点进行分析讨论。本文第 1 节针对基于 Petri 网的故障诊断研究方向的基础理论进行简要说明;第 2 节重点分析了离散事件系统的故障可诊断性以及  $K$ -可诊断性的研究方法,总结了各种研究方法在研究可诊断性理论上所取得的结论;第 3 节分别综述了 3 类离散事件系统(离散 Petri 网系统、连续 Petri 网系统和分布式 Petri 网系统)的在线故障诊断器的构造方法;第 4 节分析讨论了故障诊断的进一步研究与应用难点;最后给出全文的总结。

## 1 知识准备

有关 Petri 网的相关概念可以参考文献[3],以下是本文涉及的一些 Petri 网、自动机和形式语言的几个基本定义。

**定义 1**(离散事件系统的 FSM 模型<sup>[1]</sup>) 一个被诊断的离散事件系统的有限状态自动机(FSM)模型可以被定义为四元组  $G=(X, \Sigma, \delta, x_0)$ ,其中  $X$  为有限状态集合,  $\Sigma$  为事件集

到稿日期:2013-05-15 返修日期:2013-10-16 本文受国家自然科学基金项目(61073102,61272153,61340003)资助。

方欢(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论与应用、智能控制, E-mail: fanghuan0307@163.com;方贤文(1975—),男,博士,教授,主要研究方向为可信系统、Petri 网理论与应用;李德权(1973—),男,博士,教授,主要研究方向为分布式系统、智能控制。

合,  $\delta$  为状态转换函数,  $x_0$  为系统的初始状态。

模型  $G$  的行为描述可以对应为由  $G$  产生的前缀语言集合  $L(G)$ 。

**定义 2**( $P/T$  网<sup>[3]</sup>) 一个  $P/T$  是四元组  $N = (P, T, Pre, Post)$ , 其中  $P$  是  $m$  个库所的集合(库所在图中用圆圈表示),  $T$  是  $n$  个变迁的集合(变迁在图中用矩形框表示),  $Pre$  是输入关联矩阵,  $Post$  是输出关联矩阵,  $Pre(p, t) = w(Post(p, t) = w)$  当且仅当存在权重为  $w$  的从  $p$  指向  $t$ (从  $t$  指向  $p$ ) 的弧。

用记号  $\cdot x(x \cdot)$  表示  $x$  的前集(后集), 其中  $x \in P \cup T$ ;  $\cdot x = \{y | Pre(y, x) \neq 0\}$ ,  $x \cdot = \{y | Post(x, y) \neq 0\}$ 。另外, 可以在  $Pre$  和  $Post$  的基础上, 定义关联矩阵  $C = Post - Pre$ 。

Petri 网系统的标识  $M$  定义为:  $P \rightarrow N \cup \{0\}$ , 即为每个库所赋予一个非负整数的 token, 用小黑点表示, 用记号  $S = (N, M_0)$  表示初始标识为  $M_0$  的 Petri 网系统。

**定义 3**(变迁使能和引发<sup>[3]</sup>) 在网系统  $S = (N, M)$  中, 变迁  $t$  是使能的当且仅当  $M \geq Pre(\cdot, t)$ , 记为  $M[t]$ 。一个使能的变迁可以被引发, 引发一个使能变迁  $t$  产生一个新的系统标识  $M' = M + C(\cdot, t)$ , 记为  $M[t]M'$ 。

若存在变迁序列  $t_1, t_2, \dots, t_k$  满足条件  $M[t_1]M_1[t_2]M_2 \dots M_{k-1}[t_k]M_k$ , 则记  $\sigma = t_1 t_2 \dots t_k$ ,  $M[\sigma]M_k$ , 将所有从标识  $M$  可达的标识集合记为  $R(M)$ 。定义函数  $\sigma: T \rightarrow N \cup \{0\}$ ,  $\sigma(t)$  表示变迁  $t$  在变迁引发序列中出现的次数, 记  $\pi(\sigma) \rightarrow (N \cup \{0\})^n$  为变迁序列  $\sigma$  的变迁引发向量。

**定义 4**(状态方程<sup>[3]</sup>) 设  $S = (N, M_0)$  为一个 Petri 网系统,  $C$  为关联矩阵。若  $M \in R(M_0)$ , 则存在非负整数的  $n$  维向量  $y \in (N \cup \{0\})^n$ , 使得  $M = M_0 + C \cdot y$ 。

值得注意的是, 状态方程  $M = M_0 + C \cdot y$  只是判断  $M$  是否从  $M_0$  可达的一个必要条件, 而非充要条件, 即方程  $M = M_0 + C \cdot y$  在判断标识是否可达的问题上可能会存在伪解。

**定义 5**(变迁活性<sup>[3]</sup>) 给定一个 Petri 网系统  $S = (N, M_0)$ , 则称

- (1) 变迁  $t$  是死的, 当且仅当  $\neg M \in R(M_0); M[t]$ ;
- (2) 变迁  $t$  是一级活的, 当且仅当至少存在一个  $M \in R(M_0)$ , 满足  $M[t]$ ;
- (3) 变迁  $t$  是活的, 当且仅当  $\forall M \in R(M_0); M[t]$ 。

一个网系统  $S = (N, M_0)$  是活的, 当且仅当  $\forall t \in T$  是活的。标识  $M$  被称为死锁标识(deadlock)当且仅当  $\forall t \in T; \neg M[t]$ 。

**定义 6**(标记 Petri 网<sup>[3]</sup>) 令  $N = (P, T, Pre, Post)$  为一个  $P/T$  网,  $\Sigma$  为事件集合且  $\epsilon$  为空事件, 标记函数  $\lambda: T \rightarrow \Sigma \cup \{\epsilon\}$ ,  $M_0$  为初始标识, 则  $LP = (N, \Sigma, \lambda, M_0)$  称为一个标记 Petri 网。

除了 Petri 网的相关概念之外, 由于故障诊断的应用背景大都出现在部分可见的环境下, 因此有必要对部分可观系统(Partial Observed System, POS)的相关概念做一些基本了解。

在基于 Petri 网的离散事件系统 POS 模型中, 可以通过可观测的标准将库所和变迁进行类别划分:

(1) 将可见库所称为可测量库所(measurable places), 一般用记号  $P_o$  表示, 相对应地, 不可见库所称为不可测量库所(unmeasurable places), 一般用记号  $P_u$  表示;

(2) 将可见变迁(observable transitions)记为  $T_o$ , 而不可见变迁(unobservable transitions)记为  $T_u$ 。

在理论研究中, 基于 Petri 网的离散事件系统 POS 模型一般都会采取库所可见或变迁可见其中一种建模方式, 也有将库所可见和变迁可见结合起来进行研究的<sup>[4]</sup>。针对故障事件的建模, 一般都用故障变迁来表示, 记为  $T_f$ , 若进一步细化可以将故障类型进行划分, 如存在  $k$  个故障类别, 则分别记为  $T_f^i (1 \leq i \leq k)$ 。

## 2 故障的可诊断性研究

离散事件系统的可诊断性概念最早由 Sampath 在 1995 年提出<sup>[1]</sup>, Sampath 通过 FSM 给出可诊断性和  $K$  步可诊断性的形式化定义, 之后许多学者对这两个定义进行拓展和补充, 得到各种建模方法下可诊断性和  $K$  步可诊断性的形式化定义。为简便起见, 在此给出标记 Petri 网下可诊断性和  $K$  步可诊断性的一般性定义。

**定义 7**(可诊断性) 一个标记 Petri 网动态系统是可诊断的条件为: 在基于可见变迁标记基础上, 任意一个不可见的故障变迁发生后都能经过若干个变迁的引发而被检测到。

**定义 8**( $K$  步可诊断性) 一个标记 Petri 网动态系统是  $K$  步可诊断的条件为: 在基于可见变迁标记基础上, 任意一个不可见的故障变迁发生后都能经过最多  $K$  个变迁的引发而被检测到。

从定义 7 和定义 8 可以看出,  $K$  步可诊断是可诊断定义的加强定义。下面就从故障可诊断性判定的充分条件或充要条件出发, 综述故障可诊断研究的形式化建模技术、研究对象以及研究方法, 结论如表 1 和表 2 所列。

表 1 故障可诊断性研究方法总结

研究方法	特点	前提约束条件	可诊断性的判定条件类型	特点及局限性
自动机理论结合形式语言 <sup>[1,2]</sup>		不存在死锁状态, 不存在任意长度的不可见事件组成的环。	可诊断性的充要条件; I-可诊断性的充要条件(I-可诊断性是指带标志事件的可诊断性)	(1) 由于 FSM 的构造需要枚举系统的状态集合, 因此算法的计算复杂度是指数级的, 容易出现状态组合爆炸问题。 (2) 只适用有界系统。
将故障建模成变迁形式的标记 Petri 网理论 <sup>[5-8]</sup>		网结构和初始标识已知; 不存在无限长的不可见变迁引发序列; 无死锁状态。	可诊断性的充要条件; K-可诊断性的充要条件	(1) 虽然计算复杂度仍然是指数级的, 但是算法的运算次数明显优于基于状态枚举的 FSM 构造方法; (2) 既能针对有界网系统, 也能适用于无界网系统。
将故障建模成库所形式的标记 Petri 网理论 <sup>[9,10]</sup>		使用带输入输出的 IPN 进行建模。	K-可诊断性的充分条件	(1) 由于使用了网结构的构造算法, 因而避免了状态组合爆炸的问题, 计算复杂度是多项式级的; (2) 这种 input-output 系统建模方法在很多工业应用中不易实现; 只能适用于状态数目有界的网系统。

研究方法	特点	前提约束条件	可诊断性的判定条件类型	特点及局限性
利用极小 T-不变量的无标记 Petri 网理论 <sup>[11-13]</sup>		网结构和初始标识已知;不存在无限长的不可见变迁引发序列。	可诊断性的充分条件	(1)是基于网结构的求解算法,算法关键在于极小 T-不变量的求解;克服了状态组合爆炸问题; (2)将可诊断性判别条件转换为线性规划问题 LPP 进行解存在性的判定。
利用状态可达图的无标记 Petri 网 <sup>[4,7,14-16]</sup>		网结构和初始标识已知;不存在无限长的不可见变迁引发序列。	有界网可诊断性的充要条件 <sup>[7]</sup> ;无界网可诊断性的充分条件 <sup>[4]</sup>	(1)不论是有限网还是无界网,为了克服状态爆炸的问题,都采用了一定的方法进行状态可达图的压缩处理; (2)在进行可诊断性判别的研究过程中,同时提出了诊断器的构造算法。
整数线性规划 ILP 方法 <sup>[15]</sup>		网结构和初始标识已知;不存在无限长的不可见变迁引发序列。	有界 Petri 网系统的 K 步可诊断性	(1)不需要常规的使用可达图构建和可达图搜索算法,只需要通过线性规划的求解即可完成; (2)克服了状态可达方程可能存在伪解的问题。
线性时间模态逻辑 LTX <sup>[17]</sup>		满足模态逻辑计算的基本条件,基本方法还是基于状态搜索。	并发系统的可诊断性的充要条件	(1)引入模态描述词 O(next state)、U(until)、◇(eventually)、□(always); (2)可以适用于并发计算的情形。

表 2 基于 Petri 网的故障可诊断性研究结论总结

算法类型	特点	适用网类型	可诊断性判别结论
基于 Petri 网结构的判定算法 <sup>[5]</sup>		有界网和无界网	可诊断性和 K-可诊断性的充要条件
基于 Petri 网可达图信息的判定算法 <sup>[4,7,15]</sup>		有界网和无界网	有界网可诊断性的充要条件; 无界网可诊断性的充分条件
基于 Petri 网语言的判定算法 <sup>[1,2,5,6,8,18]</sup>		有界网和无界网	可诊断性和 K-可诊断性的充要条件
Petri 网和线性规划结合的方法 <sup>[11-13,15]</sup>		有界网和无界网	可诊断性和 K-可诊断性的充要条件
序关系和模态逻辑的方法 <sup>[17,19]</sup>		分布式系统或并行系统	可诊断性的充要条件
解释 Petri 网和线性规划方法 <sup>[20]</sup>		一类特殊的分布式系统子类	K-可诊断性的充分条件

从 Petri 建模的角度出发,故障的表示可以有两种方法:第一种将故障表示成库所形式,如 A. Ranírez-Trevino 等人<sup>[9,10]</sup>提出的 input-output 建模方法,将输入输出符号与变迁引发序列和系统标识联系在一起,并通过建模将系统库所分

为故障库所和正常库所;第二种将故障表示成一种不可见的事件,通过 Petri 网的变迁来表示,这种建模方法比较常见,如 F. Basile, M. P. Cabasino 等人提出的故障可诊断的相关研究方法<sup>[5-8,11-16]</sup>。

从表 1 和表 2 可以看出,针对 DES 系统的故障可诊断性相关研究中,一个普遍的前提条件是:不存在不可观测环;而在基于 Petri 网的故障可诊断性的研究中,一个普遍的前提约束是:系统的初始标志已知且不存在不可见变迁的环路,这主要是为了避免存在不可见变迁的无限引发序列情况。

### 3 故障诊断器的设计理论

#### 3.1 离散 Petri 网系统的故障诊断器设计

在离散事件系统中,使用离散 Petri 网进行建模进而研究故障诊断,已经取得了一系列的成果<sup>[20-38]</sup>,本节将从故障的形式化建模、故障诊断器的构造方法、构造方法的时间复杂度、故障诊断器适用的网类型以及故障诊断器研究的前提约束 5 个方面进行分析和总结,结论如表 3 所列。

表 3 离散 Petri 网系统中故障诊断研究结论总结

故障的形式化建模	故障诊断器的构造方法	算法的时间复杂度	适用网类型	前提约束条件
故障被表示成 $t_u$ , 或不可区分的 $t_o$ (即故障变迁与其他可见变迁共享一个标签) <sup>[21]</sup>	基于可达标识图的构造算法	指数复杂度	有界网和无界网	不存在不可见变迁的环路
故障表示成变迁形式,且分两种情况分析:故障变迁可见和变迁故障不可见 <sup>[22]</sup>	基于 Petri 网语言和可达标识图的构造算法	指数级复杂度	有界网	Petri 网的结构和初始标识已知,故障不可见时,要求不存在不可见变迁的环路
故障表示成系统的库所形式 <sup>[23-26]</sup>	基于 Petri 网的结构算法	多项式复杂度	有界网	无
故障由不可见变迁表示 <sup>[27-32]</sup>	基于 Petri 网可达标识图的构造算法	指数级复杂度	有界网和无界网	标记 Petri 网的初始标识已知,不存在不可见变迁的环路
故障表示成变迁 <sup>[33]</sup>	基于 Petri 网的结构算法	多项式复杂度	有界网和无界网	无环 Petri 网
故障分为事件故障和状态故障,分别被表示成变迁故障和库所故障 <sup>[34]</sup>	基于 Petri 网的结构算法,通过结构冗余方法构造故障诊断器	在时间区间 $[1, N]$ 上是多项式复杂度的	有界网和无界网	无
针对永久故障和暂时性故障进行分析,通过 CPN 的颜色集来定义故障 <sup>[35]</sup>	基于 Petri 网的可达标识图的算法	指数级复杂度,通过颜色集降低了计算次数	有界网	无
故障分为事件故障和状态故障,分别被表示成变迁故障和库所故障 <sup>[36]</sup>	基于 Petri 网可达标识图的构造算法,结合 T 不变量和 P 不变量降低计算次数	指数级复杂度	有界网和无界网	初始标识已知,打破了系统无环的约束条件
故障是随机变迁 <sup>[37]</sup>	基于随机 Petri 网的可达标识图的构造算法	指数级复杂度	随机网	马尔可夫过程等价系统

从表 3 可以看出,针对故障的形式化建模主要分为将故障视为变迁和库所两大类,在这两大类中又进一步考虑故障是可见还是不可见的。从研究结果可以看出,当故障被视为不可见变迁时,一般都要求 Petri 网系统中不存在不可见变迁的环路。

从故障诊断器的构造算法上看,研究方法主要有基于 Petri 网可达标识图的和基于 Petri 网的结构算法,一般前者的计算难度都是 NP 难的,而基于结构的构造方法都是 P 难度的。因此单从计算时间复杂度来看,基于 Petri 网结构的算法是实际可选的,但是这类算法一般都把故障视为 Petri 网系统的库所或状态,这对于工业应用中存在的大部分事件驱动系统是难以实现的。

另外,从目前故障诊断器适用的范围来看,主要研究成果体现在有界网和无界网中,针对时间 Petri 网、随机 Petri 网也有部分结论。

### 3.2 连续 Petri 网系统的故障诊断器设计

从 3.1 节的分析可以看出:在离散 Petri 网系统的故障诊断研究中存在以下两个问题:

(1)从构造时间复杂度来看,如果使用基于可达标识图的方法来构造故障诊断器,构建诊断器方法的复杂度是指数级的,则大都会由于系统可达状态数目的增多而导致状态爆炸问题,在计算复杂度上是 NP 难问题。

(2)从研究方法的前提约束来看,从表 3 可以看出:由于一般情况下故障被形式化为不可见变迁,因此在研究过程中大都要求系统不存在不可见变迁的环路。

为了克服以上两个问题,C. Seatzu, C. Mahulea, M. P. Cabasino, M. Silva 等人通过引入标识流体化(fluidization)的概念,将离散 Petri 网中的故障诊断扩展到连续 Petri 网的研究范畴中。从文献[20, 39-41]可以看出,连续 Petri 网的故障诊断器方法研究取得了以下的研究成果:

(1)首先在时间复杂度上,在连续 Petri 网系统中通过将可达标识的计算等价于线性规划问题 LPP,降低了时间复杂度。因为 LPP 问题最坏的时间复杂度为指数级,但是一般情形下使用运筹学中的数学理论都可以高效解决,很多算法可以达到多项式复杂度。文献[20]已经证明了针对特殊的连续 Petri 网子类——状态机子网和后向无冲突子网,其故障诊断器的构造方法是多项式复杂度的。

(2)其次从适用范畴来说,若将故障形式化为不可见变迁,则在离散 Petri 网系统研究范畴内要求不可见变迁子网无环,而引入了标识流体化概念后的连续 Petri 网系统中,则不再要求不可见变迁子网无环,而只是要求不可见变迁子网关于标识的状态方程无伪解。

### 3.3 基于 Petri 网的分布式系统故障诊断器设计

除了 3.1 和 3.2 节提到的离散 Petri 网和连续 Petri 网中的故障诊断器设计方法,针对具有广泛应用背景的大系统、复杂系统以及分布式系统,不少研究者提出了分布式故障诊断器的设计方法。

文献[42-49]是目前应用较广的研究思路,这些研究成果主要取得了以下的结论:

(1)从控制模式上分类,分布式故障诊断器主要分为集中

控制器和分布式控制器;集中控制器通过将子系统的局部控制器的信息进行交互和整理,得出整体系统的故障诊断算法,而分布式控制器则利用局部控制的诊断结论进行整体系统的故障诊断。文献[42-48]都是集中式的控制方法,而文献[49]既对集中诊断器进行研究,还首次对分布式控制器进行算法设计。

(2)从局部故障诊断器的信息交互方式上看,文献[42]使用变迁的防护函数(guard)来进行信息交互,文献[43]通过定义基于 Petri 网的偏序关系(partial order)来进行整个系统的信息交互,文献[44]使用整体系统状态可达图的 SCC 来实现故障诊断器,而文献[45-49]则均使用公共库所(common places)来进行信息共享和传递。可以看出,使用公共库所来实现各局部子系统之间以及子系统与整体系统的信息交互是最常见的方法。

## 4 关于故障诊断进一步的研究以及应用难点

对于故障诊断问题,有以下问题需要进一步研究:

(1)一些常见的扩展 Petri 网类型的可诊断性问题研究。有关故障可诊断性以及  $K$ -可诊断性的相关研究成果主要集中在离散 Petri 网和连续 Petri 网的范畴内。D. Lefebvre 等人<sup>[37]</sup>利用随机 Petri 网对故障检测与定位进行分析与研究,利用软件模拟的方法对现有模型进行统计分析,可以达到对一些非马尔可夫过程等价系统的统计分析目的,但是文献[37]只对正态概率分布和负指数概率分布进行了研究,而针对其他的概率分布函数还未有研究结论,值得进一步探索。除此之外,还有很多其他类型的网系统中的故障检测与诊断问题也值得我们进一步深入研究,如混杂 Petri 网、时间 Petri 网、有色 Petri 网等扩展网类型,都还未有比较完善的研究结论。

(2)复杂大系统以及分布式系统的可诊断性研究问题。目前,在工业应用中,由于应用背景的限制,很多系统的规模很大,采用模块化的建模方式对可诊断性进行分析和研究是十分必要的。文献[20]针对特殊的子网有可诊断性的结论, Y. Pencole 与 M. O. Cordier 等人根据基于递增模型的方法,分别对分布式系统和复杂系统的故障诊断与定位进行了一系列研究<sup>[50,51]</sup>,但是也存在一个问题:当系统规模增大时,有效实现递增模型来实现故障诊断算法并提高算法性能是十分困难的。因此分布式系统和复杂系统的故障检测与诊断是一个充满挑战的研究方向。

(3)分布式系统中的故障诊断器设计方法研究。如何使用集中控制或分布控制方式来实现在线故障诊断器的构造,是目前值得深入研究的另一个课题。其中,各局部子系统之间以及子系统与全局系统之间的信息共享与交互是一个设计难点。

(4)故障诊断理论的应用研究。目前,相关的研究结论中只有部分能够直接应用到工业系统中,因此将理论应用于实际,设计具体工业应用系统特别是安全关键工业系统的故障检测、定位与诊断是十分有意义的。

(5)故障诊断理论与优化控制理论的结合应用。在故障诊断的相关研究中,主要目标是可诊断性的判断以及故障诊

断器的设计,而在实际应用中,如果能在实现故障诊断的基础上对系统的结构进行优化设计,可以直接提高系统的安全效能并降低企业成本。例如,设计最优的可见库所和可见变迁的数目,并且不影响系统的故障诊断,就可以直接减少系统中感应器的数目,从而降低系统实现成本。

**结束语** 故障诊断是离散事件系统中一个重要的研究内容。本文从可诊断性的定义出发,结合现有研究的理论成果,总结了故障诊断的可诊断性判断以及故障诊断器设计方法两部分的研究结论。首先,针对故障可诊断性研究,主要分析了现有结论中关于可诊断性和  $K$ -可诊断性的研究方向、取得的结论,并具体讨论了各种方法适用的网类型、各自具备的特点和缺陷;其次,针对故障诊断器设计方法的研究,主要讨论了基于离散 Petri 网和连续 Petri 网的系统模型的故障诊断器设计方法,着重考虑了不同诊断器设计方法的形式化建模的区别,总结了各类方法的特点;再次,针对分布式系统中的故障诊断器的研究,总结了现有研究成果如何处理信息共享与传递以及采用何种方式实现诊断器;最后,指出了进一步研究和应用的方向和难点问题。

### 参 考 文 献

- [1] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S, et al. Diagnosability of discrete-event systems[J]. IEEE Trans. Autom. Control, 1995, 40(9):1555-1575
- [2] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S, et al. Failure diagnosis using discrete-event models[J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 1996, 4(2):105-124
- [3] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006
- [4] Ushio T, Onishi I, Okuda K. Fault detection based on Petri net models with faulty behaviors[C]// Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1998:113-118
- [5] Cabasino M P, Giua A, Lafortune S, et al. A new approach for diagnosability analysis of Petri nets using verifier nets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(12):3104-3117
- [6] Cabasino M P, Giua A, Lafortune S, et al. Diagnosability analysis of unbounded Petri nets[C]// Joint 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and 28<sup>th</sup> Chinese Control Conference. Shanghai, China, Dec. 2009:1267-1272
- [7] Cabasino M P, Giua A, Lafortune S, et al. Diagnosability of bounded Petri nets[C]// Joint 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and 28<sup>th</sup> Chinese Control Conference. Shanghai, China, Dec. 2009:1254-1260
- [8] Jiroveanu G, Boel R K. The diagnosability of Petri net models using minimal explanations[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(7):1663-1668
- [9] Ramírez-Trevino A, Ruiz-Beltrán E, Rivera-Rangel I, et al. Diagnosability of discrete event systems. A Petri net based approach[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, LA, 2004:541-546
- [10] Ramirez-Trevino A, Ruiz-Beltran E, Aramburo-Lizarraga J, et al. Structural diagnosability of DES and design of reduced Petri net diagnosers[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, A, 2012, 42(2):416-429
- [11] Wen Yuan-lin, Jeng M D. Diagnosability of Petri nets[C]// 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2004:4891-4896
- [12] Wen Yuan-lin, Li C H, Jeng M D. A polynomial algorithm for checking diagnosability of Petri nets[C]// Proceedings of, SMC'05: IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics. 2005:2542-2547
- [13] Wen Yuan-lin, Jeng M D. Diagnosability analysis based on T-invariants of Petri nets[C]// Proceedings of IEEE Networking, Sensing and Control. 2005:371-376
- [14] Conona D, Giua A, Seatzu C. Marking estimation of Petri nets with silent transitions[C]// 43<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control. 2004:966-971
- [15] Basile F, Chiacchio P, De Tommasi G. On  $K$ -diagnosability of Petri nets via integer linear programming[J]. Automatica, 2012 (48):2047-2058
- [16] Basile F, Chiacchio P, Tommasi G D. Sufficient conditions for diagnosability of Petri nets[C]// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Workshop on Discrete Event Systems. Göteborg, Sweden, 2008:370-375
- [17] Madalinski A, Khomenko V. Diagnosability verification with parallel LTL-X model checking based on Petri net unfoldings [C]// 2010 Conference on Control and Fault Tolerant Systems. Nice, France, 2010:398-403
- [18] Xue Fei, Zheng Da-zhong. Diagnosability for discrete event systems based on Petri net language[C]// 2004 8<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Kunming, China, Dec. 2004:2111-2116
- [19] Haar S. Qualitative diagnosability of labeled Petri nets revisited [C]// Joint 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and 28<sup>th</sup> Chinese Control Conference. Shanghai, China, 2009:1248-1253
- [20] Seatzu C, Cabasino M P, Mahulea C, et al. New result for fault detection of untimed continuous Petri nets[C]// Joint 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and 28<sup>th</sup> Chinese Control Conference. Shanghai, China, 2009:6952-6957
- [21] Cabasino M P, Giua A, Seatzu C. Diagnosis using labeled Petri nets with silent or undistinguishable fault events [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Systems, 2013, 43(2):345-355
- [22] Cabasino M P, Giua A, Hadjicosts C N, et al. Fault model identification with Petri nets[C]// Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Workshop on Discrete Event Systems. Goteborg, Sweden, 2008:455-461
- [23] Ruiz-Beltran E, Jimenez-Ochoa I, Ramirez-Trevino A, et al. Fault detection and location in DES using Petri nets[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2005:1645-1650
- [24] Ruiz-Beltran E, Lopez-Mellado E, Ramirez-Trevino A. Fault diagnosis based on Petri net reduced models[C]// 2006 3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering. 2006:1-5
- [25] Hui Ren, Mi Zeng-qiang, Zhao Hong-shan, et al. Fault diagnosis

- for substation automation based on Petri nets and coding theory [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2004; 1038-1042
- [26] Ramirez-Trevino A, Ruiz-Beltran E, Rivera-Rangel I, et al. On-line Fault Diagnosis of discrete event systems. A Petri net-based approach[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(1): 31-39
- [27] Cabasino M P, Giua A, Poggi M, et al. Discrete event diagnosis using labeled Petri nets. An application to manufacturing systems[J]. Control Engineering Practice, 2011(19): 989-1001
- [28] Fanti M P, Mangini A M, Ukovich W. Fault detection by labeled Petri nets and time constraints [C] // 2011 3<sup>rd</sup> International Workshop on Dependable Control of Discrete System. 2011; 168-173
- [29] Cabasino M P, Giua A, Seatzu C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions[J]. Automatica, 2010(46): 1531-1539
- [30] Jiroveanu G, Boel R K, De Schutter B. Fault diagnosis for time Petri nets[C]//Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Workshop on Discrete Event Systems. Ann Arbor, Michigan, USA, 2006; 313-318
- [31] Ru Yu, Hadjicostis C N. Fault diagnosis in discrete event systems modeled by Petri nets with outputs[C]//Proceedings of the 9<sup>th</sup> International workshop on Discrete Event Systems. Goteborg, Sweden, 2008; 443-448
- [32] Dotoli M, Fanti M P, Mangini A M, et al. On-line fault detection in discrete event systems by Petri nets and integer linear programming[J]. Automatica, 2009(45): 2665-2672
- [33] Qu Yi-zhi, Li Ling-xi, Chen Yao-bin, et al. Fault detection in a-cyclic Petri net models[C]//2010 Chinese Control and Decision Conference. 2010; 4059-4063
- [34] Wu Ying-quan, Hadjicostis C N. Non-concurrent fault identification in discrete event systems using encoded Petri nets states[C]//Proceedings of the 41<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, USA, 2002; 4018-4023
- [35] Garcia E, Rodriguez L, Morant F, et al. Fault diagnosis with colored Petri nets using latent nesting method[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2008; 986-991
- [36] Fliss I, Tagina M. Multiple fault diagnosis of discrete event systems using Petri nets[C] // 2011 International Conference on Communication, Computing and Control Applications. 2011; 1-6
- [37] Lefebvre D, Leclercq E. Stochastic Petri net identification for the fault detection and isolation of discrete event systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A, 2011, 41(2): 213-225
- [38] Fanti M P, Seatzu C. Fault diagnosis and identification of discrete event systems using Petri nets[C]//Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Workshop on Discrete Event Systems. Sweden, 2008; 432-435
- [39] Seatzu C, Mahulea C, Cabasino M P, et al. Fault diagnoser design for untimed continuous Petri nets[C]//2009 IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Saint Petersburg. Russia, 2009; 1598-1604
- [40] Mahulea C, Seatzu C, Cabasino M P, et al. Fault diagnosis of discrete-event systems using continuous Petri nets [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A, 2012, 42(4): 970-984
- [41] Cabasino M P, Seatzu C, Mahulea C, et al. Fault diagnosis of manufacturing systems using continuous Petri nets[C]//2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2010; 534-539
- [42] Jbairoveanu G, Boel R K. A distributed approach for fault detection and diagnosis based on time Petri net[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2006(70): 287-313
- [43] Boubour R, Jard C, Aghasaryan A, et al. A Petri net approach to fault detection and diagnosis in distributed systems. Part I : application to telecommunication networks, motivations, and modeling[C]//Proceedings of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision & Control. San Diego, California, USA, 1997; 720-725
- [44] Aghasaryan A, Fabre E, Benveniste A, et al. A Petri net approach to fault detection and diagnosis in distributed systems. Part II : extending Viterbi algorithm and HMM techniques to Petri nets[C]//Proceedings of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision & Control. San Diego, California, USA, 1997; 726-731
- [45] Ruiz-Beltran E, Ramirez-Trevino A, Lopez-Mellado E. Building Diagnosable Petri net models for distributed fault location of DES[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2004; 833-838
- [46] Genc S, Lafortune S. Distributed diagnosis of place-bordered Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 206-219
- [47] Fanti M P, Mangini A M, Ukovich W. Distributed Fault Detection by labeled Petri nets[C]//2012 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. COEX, Korea, 2012; 1195-1200
- [48] Aramburo-Lizarraga J, Lopez-Mellado E, Ramirez-Trevino A. Distributed fault diagnosis using Petri net reduced models[C]//2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2005; 702-707
- [49] Fanti M P, Mangini A M, Ukovich W. Fault detection by labeled Petri nets in centralized and distributed approaches [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(2): 392-404
- [50] Pencole Y, Cordier M O, Roze L. Incremental decentralized diagnosis approach for the supervision of a telecommunication network [C]//Proceedings of the 41<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control. 2002; 435-440
- [51] Pencole Y, Cordier M O, Roze L. A decentralized model-based diagnostic tool for complex systems[C] // Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Tools with Artificial Intelligence. 2001; 95-102