

# 三种系统可靠性评估方法的比较与分析

王瑶<sup>1</sup>, 孙秦<sup>1</sup>, 薛海红<sup>2</sup>, 严拴航<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

**摘要:** 故障树、故障 Petri 网和贝叶斯网络是评估系统可靠性、安全性的三种重要模型。其中,故障树在工程应用中应用最广,而后两种模型其各自具有不可替代的优点,可以弥补故障树在实际应用中的不足。在介绍三种模型的基础上,通过对故障树向故障 Petri 网转化方法、故障树向贝叶斯网络转化方法的研究,给出描述三种模型的典型逻辑关系等价结构图的表格,揭示三种模型的内在联系。结合该表,提出故障 Petri 网向贝叶斯网络的转化方法。同时,利用上述三种模型对导弹发动机故障进行对比分析,结果表明故障 Petri 网使故障传播过程一目了然,而通过故障 Petri 网络或故障树转化而来的等价贝叶斯网络可计算出更多定量结果。

**关键词:** 故障 Petri 网;故障树;贝叶斯网络;故障传播;因果关系

**中图分类号:** TB114.3

**文献标识码:** A

## Comparison and Analysis of Three System Reliability Evaluation Methods

Wang Yao<sup>1</sup>, Sun Qin<sup>1</sup>, Xue Haihong<sup>2</sup>, Yan Shuanhang<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Fault tree, faulty Petri net and Bayesian network are three powerful models used to assess a system's reliability and safety. Fault tree is the most widely used while each of the latter two has its own irreplaceable merits, which can make up fault tree's deficiency in practice. Based on the basic knowledge about these three models, both method for mapping fault trees into faulty Petri nets and method for mapping fault trees into Bayesian networks are discussed. Combing with these two methods stated above, a table that shows these three models' equivalent classic logic topology is presented, which reveals the inner connection among these three models. On the basis of the table, a method for mapping a faulty Petri net into Bayesian network is raised. Meanwhile, a failure event of unexpected ignition of an engine is studied and compared using these three models separately and the results show that faulty Petri net describes the process of fault propagation clear and using the equivalent Bayesian network that mapped from a Petri net or fault tree, more quantitative information can be calculated.

**Key words:** faulty Petri net; fault tree; Bayesian network; fault propagation; cause and effect relationship

## 0 引言

故障 Petri 网、故障树与贝叶斯网络均能对系

统故障事件进行图形表示,并通过其推理手段对系统进行故障诊断、可靠性评估、安全性评估、薄弱环节识别等<sup>[1-2]</sup>。

故障树是最常用的系统分析方法。通过对故障树进行定量以及定性分析,确定导致故障发生的各种可能原因,并通过定性和定量分析找出系统的薄弱环节,采取纠正措施,以提高系统的可靠性、安全性。但故障树不能表达复杂变量且涉及繁复的

收稿日期:2013-12-23; 修回日期:2014-03-02

基金项目:工信部“十二五”质量与可靠性技术基础项目  
(2052013B003)

通信作者:王瑶, wangyaorose@126.com

布尔运算<sup>[3]</sup>,故障 Petri 网存在冲突和竞争问题且难以应用更多已知概率信息<sup>[4]</sup>,使得上述两种方法的使用受到局限。

贝叶斯网络推理手段灵活,通常能够得到普通模型不能得到的结果/指标<sup>[5]</sup>,例如 MAP 结果 Petri 网表达灵活。因此,将故障树转化为其等价贝叶斯网络,采用该贝叶斯网络计算指标的方法以及将故障树转化为 Petri 网,用 Petri 网对系统进行分析的方法都进行了大量研究。其中,秦兴秋等<sup>[6]</sup>对故障树向故障 Petri 网的转化方法进行了研究,给出了应用故障 Petri 网求解最小割集的方法;Yang X 等<sup>[7]</sup>对故障树与故障 Petri 网的典型逻辑关系进行了对比,并将 Petri 网成功应用于风力发电机变距系统的可靠性评估中;王广彦等<sup>[8]</sup>、L. Portinale 等<sup>[9]</sup>对故障树向贝叶斯网络的转化方法进行了研究,后者已将等价贝叶斯网络初步应用于数控系统的可靠性分析中。目前,关于故障 Petri 网和贝叶斯网络之间关系的研究却很少。

本文在简要介绍故障树、贝叶斯网络和故障 Petri 网的基础上,对故障 Petri 网向贝叶斯网络的转化方法进行深入研究。并采用上述三种模型对同一故障系统进行评估,比较三种模型的优劣。同时,给出故障树、故障 Petri 网和贝叶斯网络典型逻辑关系等价结构图。

### 1 故障树与故障 Petri 网

故障树分析法 (Fault Tree Analysis, 称简 FTA) 将系统可能发生的某种事故与导致事故发生各种原因之间的逻辑关系用树形图的方式表示出来。通过对事故树的分析,不仅可以找出事故发生原因,还可以对系统进行薄弱环节识别、对故障进行预测等。

故障 Petri 网是由库所 P、变迁 T、有向弧和托肯组成的有向网。Petri 网描述系统时,用库所 P 表示事件,用库所中的托肯表示事件的状态,当库所中有托肯时(逻辑“1”),表示该库所表示的事件发生,若无托肯(逻辑“0”),该事件不发生;变迁 T 表示事件间的一种关系(故障逻辑关系),有向弧的方向表示故障传播方向。在 Petri 网图形描述语言中,“○”表示库所,“|”表示变迁,“·”表示托肯,

每个库所最多 1 个托肯。

简单故障 Petri 网如图 1 所示,故障 Petri 网中,位置是静态的,变迁是动态的:当变迁 T 的所有输入位置均有 1 个托肯时,变迁 T 使能,托肯从输入库所流到输出库所,这表示故障从上游传播到下游。由此可见,通过 Petri 网中的托肯变化可以反映系统的故障传播历程,因此故障 Petri 网具有描述系统变化的能力。

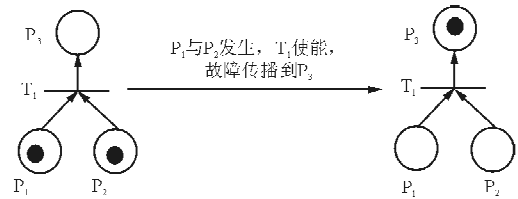


图 1 故障 Petri 网及其故障传播过程

Fig. 1 Faulty Petri net and the process of fault propagation

与故障树类似,应用故障 Petri 网分析系统时,将系统不希望发生的事件作为顶库所,逐级找出导致这一事件发生的所有可能因素作为中间库所和底库所<sup>[4]</sup>。实际上,故障 Petri 网也是一种故障逻辑关系的表达。

某导弹发动机意外点火故障树如图 2 所示<sup>[10]</sup>,底事件的物理含义以及发生概率如表 1 所示。

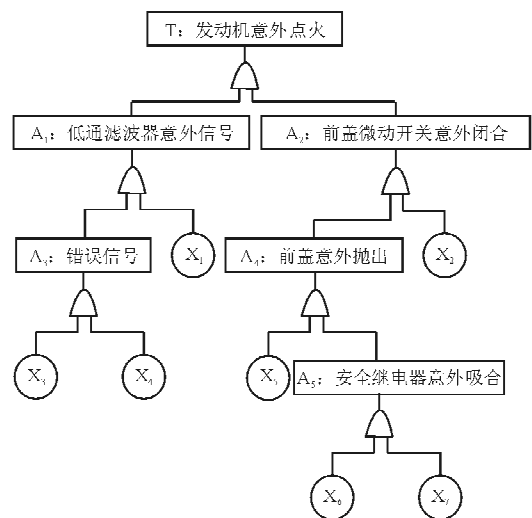


图 2 发动机意外点火故障树

Fig. 2 Fault tree for a failure event of unexpected ignition of an engine

表 1 底事件失效概率表

Table 1 Table for the failure probability of each bottom event

编 号	基本事件名称	失效概率
X <sub>1</sub>	低频干扰信号	0.000 005
X <sub>2</sub>	前盖微动开关意外闭合	0.000 005
X <sub>3</sub>	高频干扰信号	0.000 074
X <sub>4</sub>	滤波器故障	0.000 360
X <sub>5</sub>	前盖爆炸螺栓意外爆炸	0.000 856
X <sub>6</sub>	安全继电器意外吸合	0.000 910
X <sub>7</sub>	外界干扰使系统误收发射信号	0.000 280

故障树转化为等价 Petri 的方法如下:

(1) 写出故障树各逻辑门的 Petri 网表达方式; (2) 故障树的每个事件与唯一的库所对应; (3) 参考步骤(1), 根据因果关系, 将步骤(2)中每个库所用变迁和弧连接起来。

据以上转化方法, 得到的等价故障 Petri 网如图 3 所示。若库所 P、X<sub>7</sub> 中有一托肯(表示系统初始状态), T<sub>2</sub> 使能, P、A<sub>5</sub> 出现托肯, 继而 T<sub>6</sub> 使能, ……以此类推, 事件 X<sub>7</sub> 最终导致顶事件 T 发生, 传播路径为{P、X<sub>7</sub>, T<sub>2</sub>, P、A<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, P、A<sub>4</sub>, T<sub>9</sub>, P、A<sub>2</sub>, T<sub>12</sub>, P、T}, 可以清晰地表达托肯的流动。

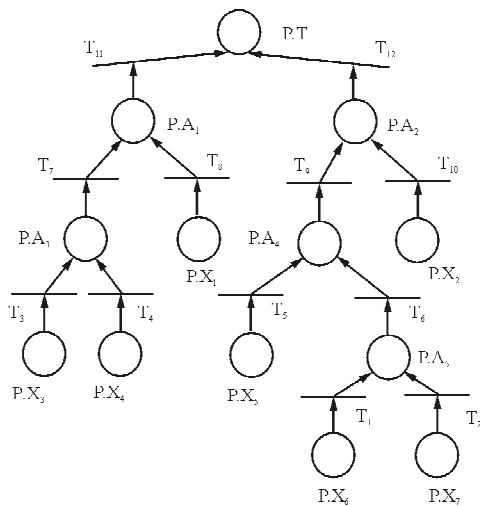


图 3 等价故障 Petri 网

Fig. 3 Equivalent faulty Petri net

故障 Petri 网的推理实质上是矩阵的运算<sup>[4]</sup>(该矩阵元素仅为 1 或 0, 无概率值), 由于矩阵运算易实现、速度快, 相比传统 FTA(上/下行法)可以高效得出最小割集<sup>[8]</sup>。然而, 对于等价故障 Petri 网, 事件的故障概率不能被利用(图 1 和图 3 中的描述故障传播过程并未涉及任何概率), 故定量

指标(例如重要度)不能被等价 Petri 网直接求解, 故障 Petri 网只能借助已求出的最小割集, 再利用传统的 FTA 方法进一步定量计算, 得到可靠度、各底事件重要度等常用指标。

综上所述, 故障树和故障 Petri 网模型均为故障逻辑关系的表达。首先, Petri 网只是将故障树的各种逻辑关系简化为只有库所和变迁组成的逻辑图形, 使动态传播关系清晰; 其次, Petri 网定性分析(最小割集计算)能力优于故障树, 定量分析能力与故障树相当。

## 2 故障树与贝叶斯网络

贝叶斯网络是一个有向无环图(Directed Acyclic Graph, 简称 DAG), 由表示变量的节点及连接这些节点的有向边构成, 有向边由父节点指向子节点, 用单箭头表示<sup>[9]</sup>。贝叶斯网络是因果关系的直观表达, 拓扑图中每个节点 X<sub>i</sub> 均有一个条件概率分布(Conditional Probability Distribution, 简称 CPD)Pr[X<sub>i</sub> | π(X<sub>i</sub>)], 其中 π(X<sub>i</sub>) 为节点 X<sub>i</sub> 的父节点集合。

贝叶斯网络的建模方法有两种: 由贝叶斯网络直接建模或者由其他已有模型转化而来。由贝叶斯网络直接建模可能难以获取条件概率, 而从已有模型转化而来的贝叶斯网络并不存在上述问题<sup>[11]</sup>。采用贝叶斯网络对故障进行分析, 故障树转化为贝叶斯网络的方法如下: (1) 故障树中的每个事件与贝叶斯网络中唯一一节点对应, 对于重复事件只建立一个节点<sup>[9]</sup>; (2) 根据故障树中间/底事件所属逻辑门确定贝叶斯网络中非根节点的 CPD<sup>[8]</sup>; (3) 根据底事件的故障概率确定根节点的 CPD, 若底事件 X<sub>i</sub> 的概率为 q<sub>i</sub>, 则等价贝叶斯网络中的相应节点的 CPD 为: Pr(X<sub>i</sub> = 0) = 1 - q<sub>i</sub>, Pr(X<sub>i</sub> = 1) = q<sub>i</sub>。

根据以上步骤, 得到的等价贝叶斯网络模型如图 4 所示。应用贝叶斯网络分析软件 ISAMM, 计算出的不可靠度为 0.002 490, 与传统 FTA 计算结果相同。其中, 应用贝叶斯网络不仅可计算出顶事件发生后, 底事件为事故原因的概率(诊断推理), 还可计算底事件发生后, 顶事件发生的概率(因果推理)。诊断推理结果是进行故障诊断和薄弱环节识别的重要信息, 然而利用传统的故障树分

析方法难以计算出该结果<sup>[12]</sup>。贝叶斯网络推理结果如表 2 所示,各底事件因果推理结果一样,故难以识别薄弱环节;而通过贝叶斯网络的诊断推理结果,薄弱环节可得到识别,这是故障树分析法无法做到的。除此之外,其他传统指标(例如最小割集、概率重要度等)均可以通过贝叶斯网络推理技术得到<sup>[13]</sup>。

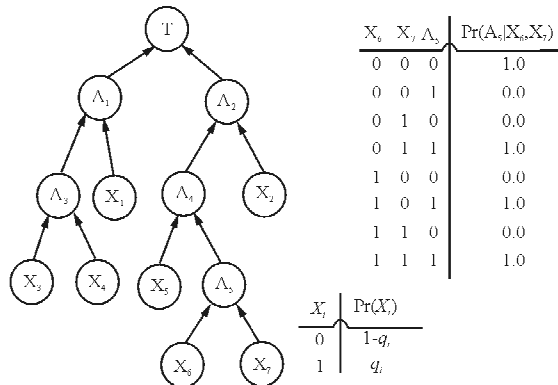


图 4 等价贝叶斯网络以及节点 CPDs  
(其他非根节点 CPD 与  $\Lambda_5$  类似)

Fig. 4 Equivalent Bayesian network and CPDs  
(other non-root nodes' CPDs are similar to  $\Lambda_5$ 's)

表 2 贝叶斯网络推理结果

Table 2 Results calculated from Bayesian network

编号	诊断推理	因果推理
$X_1$	0.002 010	1.0
$X_2$	0.002 010	1.0
$X_3$	0.029 745	1.0
$X_4$	0.144 707	1.0
$X_5$	0.344 081	1.0
$X_6$	0.365 787	1.0
$X_7$	0.112 550	1.0

综上所述,故障树分析法可得到的结果通过贝叶斯网络均可以得到,而贝叶斯网络可以得到的结果,通过故障树分析法不一定可以得到。除此之外,贝叶斯网络的拓扑结构更加简洁。

### 3 故障 Petri 网与贝叶斯网络

#### 3.1 故障 Petri 网存在的问题

随着设备的复杂度增加,故障和征兆之间不再是一一对应关系。概括来讲,故障传播模式分为五种:一因一果、多因一果、竞争模式、一因多果及多

因多果,其中多因多果可以拆分为前四种基本模式的组合。

如前所述,故障 Petri 网通过托肯的流动可以表示系统故障的动态传播过程。然而,传统的故障 Petri 网存在以下两个问题:

(1) 冲撞和冲突问题。竞争模式存在冲撞问题(空间资源竞争),一因多果模式存在冲突问题。而按故障传播机理来看,故障在传播过程中存在着并发特性,可同时存在多条传播路径,不存在冲突问题;而两个故障原因可同时导致同一故障现象,不存在冲撞问题。故必须对传统故障 Petri 网变迁规则进行修改,以消除冲突和冲撞问题<sup>[4]</sup>。冲突问题示意图如图 5 所示,系统在状态 1 下,  $T_1$  与  $T_2$  均使能,则系统可能出现状态 2、状态 3 两种情况。而实际情况为  $P_1$  发生时,  $P_2$  与  $P_3$  应该均有托肯,而不是  $P_2$  或  $P_3$  有托肯。冲撞问题分析与此类似。

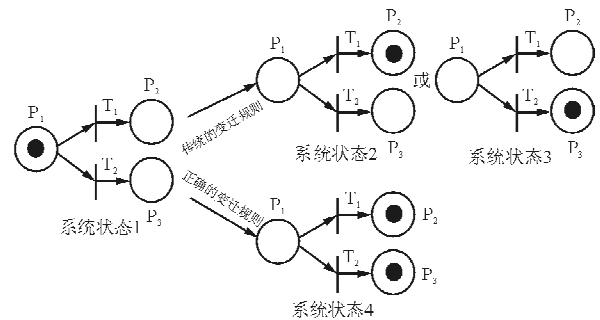


图 5 冲突问题

Fig. 5 Conflict problem

(2) 故障传播过程的描述与真实情况相违。上游故障传播到下游时,上游故障应该仍然存在。而依照传统的变迁规则,在图 1 中,  $T_1$  使能后,库所  $P_1$  与  $P_2$  中的托肯消失了(表示上游故障不存在了),与真实情况相违。故 Petri 网的变迁规则必须修改,正确变迁规则下的故障传播过程如图 6 所示。

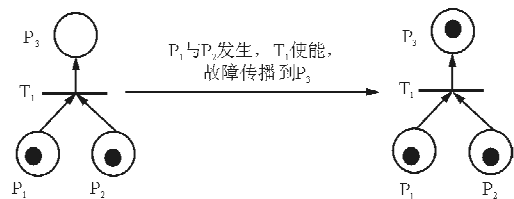


图 6 正确迁规则下的故障传播过程

Fig. 6 Process or fault propagation under correct transition

综上所述,必须对变迁规则进行上述两方面的修改,故障 Petri 网才能正确表达传播过程。贝叶斯网络作为一个有向无环图,本身并不存在冲突和冲撞问题。将故障 Petri 网转化为贝叶斯网络后,上述两个问题自动消失。故障 Petri 网难以应用系统中各个事件发生的概率,将故障 Petri 网转化为贝叶斯网络后,这些已知概率可以得到有效利用。

故障树、Petri 网和贝叶斯网络典型逻辑关系等价结构图如表 3 所示,揭示了三种模型的内在的联系,且表达形式最为简洁,可辅助实现故障 Petri 网或故障树向等价贝叶斯网络的转换。

表 3 故障树、Petri 网和贝叶斯网络典型逻辑关系等价结构图

Table 3 Fault tree, Petri net and Bayesian network's equivalent classic logic topology

故障传播类型	故障树	Petri 网	贝叶斯网络
无逻辑门 (一因一果)			
与门 (多因一果)			
或门 (竞争模式)			
一事件对应 多逻辑门 (一因多果)			

### 3.2 故障 Petri 网向贝叶斯网络转化的方法

故障 Petri 网向贝叶斯网络转化的方法如下:

(1) 确定 Petri 网中各个库所的传播方式,将多因多果拆分为其他四种故障传播的基本方式;

(2) 一因一果不存在对应逻辑门;多因一果对应与门;竞争模式对应或门;一因多果表示一个事件参与多个逻辑关系;根据故障树中逻辑门与贝叶斯网络转化关系<sup>[8]</sup>,将 Petri 网的多种传播方式映射成等价贝叶斯网络;

(3) 生成底库所对应节点的 CPD。若底库所事件  $P, X_i$  发生概率为  $q_i$ ,则贝叶斯网络节点  $X_i$  的 CPD 为:  $\Pr(X_i=0)=1-q_i, \Pr(X_i=1)=q_i$ ;

(4) 生成中间库所/顶库所对应节点的 CPD,该 CPD 由其上游传播方式决定。假设中间库所/

顶库所  $P, X_i$  自身发生概率为  $q_i$ (内因部分),节点  $X_i$  的 CPD(内因和外因的共同作用)给出方法如下:

(a) 一因一果。假设  $X_i$  的上游节点为  $X_{i-1}$ ,则  $X_i$  的 CPD 为:  $\Pr(X_i=1|X_{i-1}=0)=q_i, \Pr(X_i=1|X_{i-1}=1)=1.0$ ;

(b) 多因一果。假设  $X_i$  的上游节点有 2 个,依次为  $X_1$  和  $X_2$ 。其 CPD 为:  $\Pr(X_i=1|X_1=0, X_2=0)=q_i, \Pr(X_i=1|X_1=0, X_2=1)=q_i, \Pr(X_i=1|X_1=1, X_2=0)=q_i, \Pr(X_i=1|X_1=1, X_2=1)=1.0$ 。依次类推,若上游有  $n$  个节点,  $X_i$  的 CPD 中,仅  $\Pr(X_i=1|X_1=1, X_2=1, \dots, X_n=1)=1.0$ ,其余  $\Pr[X_i=1|\pi(X_i)]=q_i$ 。

(c) 竞争模式。假设  $X_i$  的上游节点有 2 个,依次为  $X_1$  和  $X_2$ 。其 CPD 为:  $\Pr(X_i=1|X_1=0, X_2=0)=q_i, \Pr(X_i=1|X_1=0, X_2=1)=1.0, \Pr(X_i=1|X_1=1, X_2=0)=1.0, \Pr(X_i=1|X_1=1, X_2=1)=1.0$ 。依次类推,若上游有  $n$  个节点,  $X_i$  的 CPD 中,仅  $\Pr(X_i=1|X_1=1, X_2=1, \dots, X_n=1)=q_i$ ,其余  $\Pr[X_i=1|\pi(X_i)]=1.0$ 。

(d) 一因多果。在该模式中,假设下游库所有  $n$  个,则可依据以上三模式给出该  $n$  个库所对应节点的 CPD,共计  $n$  个 CPD。

在图 3 中,所有中间库所自身发生的概率均为  $q_i=0$ ,根据上述步骤,得到的等价贝叶斯网络仍为图 4,与第 2 部分故障树向贝叶斯网络转化的结果一致,验证了上述转化方法的正确性。

如前所述,首先,故障 Petri 网因不能有效利用底事件失效概率,难以对故障事件进行定量分析,只能通过矩阵计算得出最小割集,然后通过最小割集间接进行定量分析,故其定量分析能力与故障树相当,不如贝叶斯网络;其次,虽然 Petri 网更适宜描述动态系统,但是故障传播是一个特殊的动态系统,传统的故障 Petri 网存在冲突和冲撞问题,必须对其变迁规则进行修改;最后,贝叶斯网络的拓扑结构比故障 Petri 网简洁。

## 4 结 论

(1) 故障树、Petri 网和贝叶斯网络均为故障因果(传播)关系的表达,而贝叶斯网络表达方式更为简洁。除了节点和有向边外,故障树需借助各种逻辑门,故障 Petri 网需借助托肯和变迁,而贝叶

斯网络不需借助额外的图形元素,故更适于描述大型复杂系统。

(2) 贝叶斯网络可实现双向推理:因果推理和诊断推理,计算出更多有用指标,这是故障树和 Petri 网难以做到的。当通过故障树或者故障 Petri 网计算得到的信息不足以对系统进行有效评价时,通过贝叶斯网络可计算出更多额外的有用信息。

(3) 贝叶斯网络简化了因果模型的表示形式,不如 Petri 在故障动态传播描述方面形象直观。首先,故障 Petri 网将最小割集的求解方法转化为代数矩阵的求解,避免了繁琐的布尔不交化运算。其次,故障 Petri 网通过托肯的流动使故障的动态传播过程一目了然,故通过故障 Petri 网可以得到故障的传播路径。但此优点必须以修改传统 Petri 网的变迁规则为前提,增加了工作量。

综上所述,故障 Petri 网和贝叶斯网络模型在实际应用中可互为补充。当需要动态描述故障传播过程,求解故障传播路径或求解最小割集时,首选故障 Petri 网。而当需要通过求解定量指标对系统进行更为全面的分析时,首选贝叶斯网络。

### 参考文献

- [1] Trivedi K S, Hunter S, Garg S, et al. Reliability analysis techniques explored through a communication network example[EB/OL]. (1996)[2013-12-23]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.45.7979>.
- [2] 杜军威,徐中伟. Petri 网模型的 FTA 安全性分析[J]. 计算机工程, 2007, 33(13): 16-18, 48.  
Du Junwei, Xu Zhongwei. Safety analysis of Petri net model based on FTA[J]. Computer Engineering, 2007, 33(13): 16-18, 48. (in Chinese)
- [3] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Comparing fault trees and Bayesian networks for dependability analysis [M]// Computer safety, Reliability and Security, Springer Berlin Heidelberg, 1999: 310-322.
- [4] 付阶辉. 基于 Petri 网的故障诊断方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.  
Fu Jiehui. Research on fault diagnosis methods based on Petri net[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [5] 杨昌昊,胡小建,竺长安. 从故障树到故障贝叶斯映射的故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1481-1486.  
Yang Changhao, Hu Xiaojian, Zhu Changan. Fault diagnosis method mapping from fault trees to fault Bayesian networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1481-1486. (in Chinese)
- [6] 秦兴秋,邢昌凤. 一种基于 Petri 网模型求解故障树最小割集的算法[J]. 计算机应用, 2004, 24(1): 299-300.  
Qin Xingqiu, Xing Changfeng. An algorithm for solving minimal cut sets based on Petri net[J]. Journal of Computer Applications, 2004, 24(1): 299-300. (in Chinese)
- [7] Yang X, Liu W, et al. Petri net model and reliability evaluation for wind turbine hydraulic variable pitch systems[J]. Energies, 2011, 4(6): 978-997.
- [8] 王广彦,马志军,胡起伟. 基于贝叶斯网络的故障树分析[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 78-83.  
Wang Guangyan, Ma Zhijun, Hu Qiwei. The fault tree analysis based on Bayesian networks[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(6): 78-83. (in Chinese)
- [9] Portinale L, Bobbio A. Bayesian networks for dependability analysis: an application to digital control reliability[C]// Proceedings of the Fifteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999: 551-558.
- [10] 吴进煌. 舰空导弹发动机意外点火故障树分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 21(6): 653-656.  
Wu Jinhuang. FTA of suddenness blast-off of the engine of the ship-to-air missile[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21(6): 653-656. (in Chinese)
- [11] Darwiche A. Bayesian networks[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(12): 80-90.
- [12] 尹晓伟,钱文学,谢里阳. 系统可靠性的贝叶斯网络评估方法[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1482-1489.  
Yin Xiaowei, Qian Wenxue, Xie Liyang. A method for system reliability assessment based on Bayesian networks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1482-1489. (in Chinese)
- [13] 周忠宝,董豆豆,周经伦. 贝叶斯网络在可靠性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(6): 95-100.  
Zhou Zhongbao, Dong Doudou, Zhou Jinglun. Application of Bayesian networks in reliability analysis[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26(6): 95-100. (in Chinese)

### 作者简介:

王 瑶(1989—),女,博士研究生。主要研究方向:可靠性分析、故障诊断、人工智能等。

孙 秦(1956—),男,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构综合优化设计、可靠性分析等。

薛海红(1976—),男,高级工程师。主要研究方向:飞行器可靠性、安全性、测试性分析等。

严拴航(1979—),男,高级工程师。主要研究方向:飞行器可靠性、安全性、测试性分析等。

(编辑:赵毓梅)