DOI: 10.3901/JME.2020.10.244

连续时间 T-S 动态故障树分析方法*

姚成玉¹ 王传路¹ 陈东宁^{2,3} 魏 星¹ 吕世君^{2,3}

- (1. 燕山大学河北省工业计算机控制工程重点实验室 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制重点实验室 秦皇岛 066004;
3. 先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室(燕山大学) 秦皇岛 066004)

摘要: 相对于 DUGAN 动态故障树分析方法, 离散时间 T-S 动态故障树分析方法增强了故障树描述静、动态失效行为的能力, 且可以直接定量分析, 但存在分析计算误差、且不能反映系统可靠度变化趋势。为此, 提出连续时间 T-S 动态故障树分析方法。定义描述静、动态失效行为的连续时间 T-S 动态门, 提出基于下级事件时序关系及事件发生冲激函数描述与上级事件发生可能性的连续时间 T-S 动态门描述规则构建方法, 利用冲激函数冲激点的积分特性, 进而提出基于描述规则执行度与上级事件发生可能性及冲激函数积分的上级事件故障概率密度函数和故障概率分布函数的分析计算方法。所提连续时间 T-S 动态故障树分析方法具有相对于 DUGAN 动态故障树分析方法更强的失效行为描述能力, 解决了离散时间 T-S 动态故障树分析方法的分析计算误差问题、且能反映系统故障概率变化。通过与基于 Markov 链、离散时间贝叶斯网络、连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法及离散时间 T-S 动态故障树分析方法进行对比, 验证了所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法具有可行性, 且更有优势。

关键词: 故障树; 动态故障树; T-S 动态故障树; T-S 动态门; 连续时间

中图分类号: TB114; TH137

Continuous-time T-S Dynamic Fault Tree Analysis Method

YAO Chengyu¹ WANG Chuanlu¹ CHEN Dongning^{2,3} WEI Xing¹ LÜ Shijun^{2,3}

- (1. Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004;
2. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004;
3. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science(Yanshan University),
Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Compared with DUGAN dynamic fault tree analysis method, discrete-time T-S dynamic fault tree analysis method enhances the ability of the fault tree to describe static and dynamic failure behavior, and can directly analyze a system directly quantitatively, but it has analysis and calculation errors, and can not reflect the change trend of system reliability. To this end, continuous-time T-S dynamic fault tree analysis method is proposed. The continuous-time T-S dynamic gates describing static and dynamic failure behavior are defined, a method of constructing continuous-time T-S dynamic gates describing rules based on the temporal relationship of lower-level events and the description of events occurrence impulse function and the possibility of higher-level event occurrence is proposed by using the integral characteristic of impulse function at impulse point. Then analysis and calculation methods based on the description of the rule execution degree and the possibility of the higher-event and the higher-event failure probability density function and the failure probability distribution function of the impulse function integration are proposed. The proposed continuous-time T-S dynamic fault tree analysis method has stronger failure behavior description ability than DUGAN dynamic fault tree analysis method, it solves the problem of analysis and calculation errors of discrete-time T-S dynamic fault tree analysis method and can reflect the change trend of system failure probability. Compared with Markov chain, discrete-time Bayesian network, continuous-time Bayesian network solving DUGAN dynamic fault tree and discrete-time T-S dynamic fault tree analysis method, the feasibility of continuous-time T-S dynamic fault tree analysis method is verified and continuous-time T-S dynamic fault

* 国家自然科学基金(51675460、51975508)和中国博士后科学基金(2017M621101)资助项目。20190627 收到初稿, 20191109 收到修改稿

tree analysis method has more advantages.

Key words: fault tree; dynamic fault tree; T-S dynamic fault tree; T-S dynamic gate; continuous-time

0 前言

故障树分析方法因直观有效等优点在系统可靠性分析中得到了广泛应用^[1-3]。故障树分析方法根据描述静、动态失效行为的不同,可分为静态故障树分析方法和动态故障树分析方法,前者包括传统故障树和 T-S 故障树分析方法,后者包括 DUGAN 动态故障树和离散时间 T-S 动态故障树分析方法。

相对于传统故障树分析方法^[4-5], T-S 故障树分析方法^[6]可以刻画任意形式的组合、多态等静态失效行为,相对于传统故障树具有更好的泛化能力,可视为故障树发展的一次变革。学者们对 T-S 故障树进行了发展研究和应用扩展。例如,文献[7-8]分别将 T-S 故障树分析方法应用于液压系统、卫星姿态控制系统可靠性分析;文献[9]通过对 T-S 故障树所表示的系统赋予性能变量及故障多态下的不同性能值,提出一种分析系统故障多态下的性能可靠性方法,针对多态系统因部件故障造成系统性能降低问题,定义了性能变量,并引入期望值理论,提出了多态系统性能可靠性分析方法;文献[10]提出一种基于 T-S 故障树的公路隧道冻害分析方法,发现了导致隧道衬砌漏水结冰的关键问题;文献[11]结合贝叶斯网络可以双向推理、计算简便等优势,提出了基于 T-S 故障树及贝叶斯网络的可靠性评估方法,并用于多态液压系统可靠性分析;文献[12]利用空间故障树方法,并结合 T-S 故障树和贝叶斯网络,建立了一种系统可靠性分析方法;文献[13]提出了凸模型 T-S 故障树及重要度分析方法,解决了系统部件失效可能性无法精确获取及界定不确定性参量的取值范围问题。

在传统故障树的基础上, DUGAN 动态故障树分析方法^[14]实现了故障树分析方法从静态到动态的跨越,将传统故障树延伸到了动态故障树,解决了故障树不能描述时序性、冗余性、相关性等动态特性的问题。学者们从 DUGAN 动态门的扩展及定量分析计算方法等方面展开研究。在 DUGAN 动态门拓展方面,文献[15]提出了优先或门、同时与门,增强了动态故障树表达时序相关性的能力;文献[16]针对部件故障时子系统有延时故障的情况,提出了描述延时失效行为的延时门。文献[17]针对离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树传统分析方法的计算误差,提出了改进动态门转化的改良方法,修正优先与门、备件门等动态门的条件概率表中下

级事件时序关系描述,补偿了传统分析方法的分析计算误差。DUGAN 动态故障树定量分析常借助于 Markov 链^[18-20]、Monte Carlo 仿真^[21-22]、贝叶斯网络^[23-25]、顺序二元决策图^[26]等。例如,文献[27]考虑了系统故障修复以及冗余的动态特性,利用 Markov 链分析求解 DUGAN 动态故障树;文献[28]将动态故障树应用于深海采油树系统的风险评估,并根据 Monte Carlo 仿真法进行定量分析,计算顶事件故障概率以及基本事件的概率重要度和结构重要度;文献[29]基于 DUGAN 动态故障树转化为离散时间贝叶斯网络的计算方法,给出了系统失效分布、组件重要度等计算方法,并解决了备件节点失效时间仅能是指数分布的限制;文献[30]提出了连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法,引入单位阶跃函数和冲激函数构造上级事件条件概率密度函数,进而求解顶事件故障概率;文献[31]提出了一种基于顺序二元决策图的动态故障树分析方法,给出了考虑不完全覆盖时系统的可靠性计算方法。

上述分析方法建立在 DUGAN 动态故障树的基础上,难以描述任意形式的静、动态失效行为,且无法直接定量分析。针对这些问题,课题组提出了离散时间 T-S 动态故障树分析方法^[32],将 T-S 故障树延伸到 T-S 动态故障树,增强了故障树描述静、动态失效行为的能力,但存在分析计算误差,且不能反映系统可靠度变化趋势。为此,提出连续时间 T-S 动态故障树分析方法,定义描述静、动态失效行为的连续时间 T-S 动态门,提出基于下级事件时序关系及事件发生冲激函数描述与上级事件发生可能性的连续时间 T-S 动态门描述规则构建方法,利用冲激函数冲激点的积分特性,进而提出基于描述规则执行度与上级事件发生可能性及冲激函数积分的上级事件故障概率密度函数和故障概率分布函数的分析计算方法。最后通过与基于 Markov 链、离散及连续时间贝叶斯网络求解 DUGAN 动态故障树分析方法、离散时间 T-S 动态故障树分析方法进行对比,验证所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法的可行性。

1 连续时间 T-S 动态故障树

针对离散时间 T-S 动态故障树分析方法存在分析计算误差、不能反映系统可靠度变化趋势的问题,提出连续时间 T-S 动态故障树分析方法。首先定义

描述静、动态失效行为的连续时间 T-S 动态门及其描述规则构建方法,利用冲激函数冲激点的积分特性,提出基于描述规则执行度与上级事件发生可能性及冲激函数积分的上级事件故障概率密度函数和故障概率分布函数的分析计算方法。

1.1 分析流程

连续时间 T-S 动态故障树分析流程如图 1 所示,其分析流程如下。

(1) 资料调研,系统分析与故障分析,选择系统的顶事件,建造连续时间 T-S 动态故障树。

(2) 根据事件间的逻辑关系及故障时序关系,从而构建得到能更全面及准确描述系统静、动态逻辑关系的连续时间 T-S 动态门描述规则。

(3) 考虑事件不确定性描述方法,事件不确定性模型包括随机模型、模糊模型、非概率模型等,对应的基础数据为故障率/故障概率、模糊数/模糊集、区间/超椭圆等。

(4) 利用连续时间 T-S 动态故障树算法得到规则执行度及上级事件故障概率,进而求得顶事件的故障概率。

图1 连续时间 T-S 动态故障树分析流程

1.2 连续时间 T-S 动态门及其描述规则

DUGAN 动态故障树由静态子树和动态子树组成,静态子树为传统故障树,用传统逻辑门描述静态失效行为,如与、或门等,动态子树中用备件门、优先与门、功能相关门、顺序相关门等 DUGAN 动态门描述动态失效行为。DUGAN 动态门(备件门、优先与门、功能相关门和顺序相关门等)的诞生,使得故障树具有描述动态失效行为的能力。传统逻辑门及 DUGAN 动态门所描述的失效行为可以通过构建连续时间 T-S 动态门及其描述规则来实现,如图 2 所示。

图2 连续时间 T-S 动态门及其描述规则

设下级事件 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 及上级事件 y 的故障时间分别用 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 及 t 表示,用冲激函数约束上级事件 y 与下级事件 x_i 的故障时间的关系,如式(1)所示。

$$\delta(t-t_i) = \begin{cases} 0 & t \neq t_i \\ \infty & t = t_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, t 为时间; t_i 为冲激点的时刻。若 $\delta(t-t_i) = \infty$, 即 $t=t_i$ 时, 表示 x_i 故障后 y 立即故障。

连续时间 T-S 动态门的描述规则是基于 T-S 动态门的逻辑关系、故障时序关系进行构建的,其每一条描述规则 $l (l=1, 2, \dots, r)$ 表示下级事件 x_i 的一个故障时序,规则数 r 可由式(2)得到,则描述规则 l 可表述如下。

规则 l : 首先规则 l 界定下级事件的故障时序,即时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的大小关系,若下级事件 x_1 在时间 t_1 故障, x_2 在时间 t_2 故障, $\dots$, x_n 在时间 t_n 故障,则上级事件 y 在时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 故障的可能性分别为 $P_{(l)}(y^{[t_1]}), P_{(l)}(y^{[t_2]}), \dots, P_{(l)}(y^{[t_n]})$ 。

$$r = n! + 1 + \sum_{i=1}^{n-2} C_n^{n-i} ((i+1)!) \quad (2)$$

用自然数 $o(t_i) (i=1, 2, \dots, n-1, n)$ 表示下级事件 x_i 的故障时序即发生顺序,数值小的先于数值大的发生。例如,当 $t_1 = t_2 = \dots = t_{n-1} = t_n$ 时,则用 $o(t_1) = o(t_2) = \dots = o(t_{n-1}) = o(t_n) = 1$ 表示;当 $t_1 = t_2 = \dots = t_{n-1} < t_n$ 时,则用 $o(t_1) = o(t_2) = \dots = o(t_{n-1}) = 1, o(t_n) = 2$ 表示;依此类推。

综上,图 2 中连续时间 T-S 动态门的描述规则如下。

表 1 中每一行代表一条规则,以第 1 行、第 2 行和第 r 行即规则 1、规则 2 和规则 r 为例。规则 1 表示下级事件 $x_1 \sim x_n$ 在同一时间故障,即 $t_1 = t_2 = \dots = t_n$,则上级事件 y 在时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 故障可能性分别为 $P_{(1)}(y^{[t_1]}), P_{(1)}(y^{[t_2]}), \dots, P_{(1)}(y^{[t_n]})$;规则 2 表示下级事件 $x_1 \sim x_{n-1}$ 同一时间故障,且故障时间先于下级事件 x_n ,即 $t_1 = t_2 = \dots = t_{n-1} < t_n$,则上级事件 y 在时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 故障可能性分别为 $P_{(2)}(y^{[t_1]}), P_{(2)}(y^{[t_2]}), \dots, P_{(2)}(y^{[t_n]})$;规则 r 表示下级事件 $x_1 \sim x_n$ 按 $t_n, \dots, t_2, t_1$ 的时序故障,即 $t_1 > t_2 > \dots > t_{n-1} >$

t_n , 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_n 故障可能性分别为 $P_{(r)}(y^{[t_1]})$ 、 $P_{(r)}(y^{[t_2]})$ 、 $\dots$ 、 $P_{(r)}(y^{[t_n]})$ 。

表 1 连续时间 T-S 动态门的描述规则

规则	x_1	x_2	$\dots$	x_{n-1}	x_n	y			
						$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$	$\dots$	$\delta(t-t_n)$
1	1	1	$\dots$	1	1	$P_{(1)}(y^{[t_1]})$	$P_{(1)}(y^{[t_2]})$	$\dots$	$P_{(1)}(y^{[t_n]})$
2	1	1	$\dots$	1	2	$P_{(2)}(y^{[t_1]})$	$P_{(2)}(y^{[t_2]})$	$\dots$	$P_{(2)}(y^{[t_n]})$
3	1	1	$\dots$	2	1	$P_{(3)}(y^{[t_1]})$	$P_{(3)}(y^{[t_2]})$	$\dots$	$P_{(3)}(y^{[t_n]})$
4	1	1	$\dots$	2	2	$P_{(4)}(y^{[t_1]})$	$P_{(4)}(y^{[t_2]})$	$\dots$	$P_{(4)}(y^{[t_n]})$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$
l	$o(t_1)$	$o(t_2)$	$\dots$	$o(t_{n-1})$	$o(t_n)$	$P_{(l)}(y^{[t_1]})$	$P_{(l)}(y^{[t_2]})$	$\dots$	$P_{(l)}(y^{[t_n]})$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$
r	n	$n-1$	$\dots$	2	1	$P_{(r)}(y^{[t_1]})$	$P_{(r)}(y^{[t_2]})$	$\dots$	$P_{(r)}(y^{[t_n]})$

用连续时间 T-S 动态门可以替代传统逻辑门和 DUGAN 动态门, 下面以与门、优先与门、或门、温备件门为例进行说明。

当连续时间 T-S 动态门表示下级事件 x_1 、 x_2 的与门逻辑关系时, 则上级事件 y 的故障时间 t 为下级事件 x_1 、 x_2 两者中后故障的时间, 因此, 上述与门逻辑关系可用表 2 所示的规则描述。

表 2 与门的描述规则

规则	x_1	x_2	y	
			$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	1	0

表 2 中的规则 1 表示下级事件 x_1 、 x_2 在同一时间故障, 即 $t_1 = t_2$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 故障可能性分别为 1、1; 规则 2 表示下级事件 x_1 先于 x_2 故障, 即 $t_1 < t_2$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 故障可能性分别为 0、1; 规则 3 表示下级事件 x_2 先于 x_1 故障, 即 $t_1 > t_2$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 故障可能性分别为 1、0。

当连续时间 T-S 动态门表示下级事件 x_1 、 x_2 的优先与门逻辑关系时, 即仅当下级事件按 x_1 先于 x_2 故障的优先顺序故障时, 上级事件 y 才故障, 则上级事件 y 的故障时间 t 与下级事件 x_2 故障时间相同, 因此, 上述优先与门逻辑关系可用表 3 所示的规则描述。

表 3 优先与门的描述规则

规则	x_1	x_2	y	
			$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	0	0

表 3 中的规则 1 表示下级事件 x_1 、 x_2 在同一时

间故障, 即 $t_1 = t_2$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 故障可能性分别为 1、1; 规则 2 表示下级事件 x_1 先于 x_2 故障, 即 $t_1 < t_2$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 故障可能性分别为 0、1; 规则 3 表示下级事件 x_2 先于 x_1 故障, 即 $t_1 > t_2$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 故障可能性分别为 0、0。

当 T-S 动态门表示下级事件 x_1 、 x_2 、 x_3 的或门逻辑关系时, 即上级事件 y 的故障时间 t 为 x_1 、 x_2 、 x_3 三者中最先故障的时间, 因此, 上述或门逻辑关系可用表 4 所示的规则描述。

表 4 或门的描述规则

规则	x_1	x_2	x_3	y		
				$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$	$\delta(t-t_3)$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	1	1	0
3	1	2	1	1	0	1
4	1	2	2	1	0	0
5	2	1	1	0	1	1
6	2	1	2	0	1	0
7	2	2	1	0	0	1
8	1	2	3	1	0	0
9	1	3	2	1	0	0
10	2	1	3	0	1	0
11	2	3	1	0	0	1
12	3	1	2	0	1	0
13	3	2	1	0	0	1

以规则 1、规则 2 及规则 13 为例说明, 规则 1 表示下级事件 x_1 、 x_2 、 x_3 在同一时间故障, 即 $t_1 = t_2 = t_3$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 故障可能性分别为 1、1、1; 规则 2 表示下级事件 x_1 、 x_2 同时故障后 x_3 故障, 即 $t_1 = t_2 < t_3$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 故障可能性分别为 1、1、0; 规则 13 表示下级事件 $x_1 \sim x_3$ 按 t_3 、 t_2 、 t_1 的时序故障, 即 $t_1 > t_2 > t_3$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 故障可能性分别为 0、0、1。

当 T-S 动态门表示下级事件 x_1 、 x_2 、 x_3 的温备件门逻辑关系时, 即当主件故障后备件也故障时, 则上级事件 y 故障, 因此, 上述温备件门逻辑关系可用表 5 所示的规则描述。

以规则 1、规则 2 及规则 13 为例说明, 规则 1 表示下级事件 x_1 、 x_2 、 x_3 在同一时间故障, 即 $t_1 = t_2 = t_3$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 故障可能性分别为 1、1、1; 规则 2 表示下级事件 x_1 、 x_2 同时故障后 x_3 故障, 即 $t_1 = t_2 < t_3$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 故障可能性分别为 0、0、1; 规则 13 表示下级事件 $x_1 \sim x_3$ 按 t_3 、 t_2 、 t_1 的时序故障, 即 $t_1 > t_2 > t_3$, 则上级事件 y 在时间 t_1 、 t_2 、 t_3 故障可能性分别为 1、0、0。

表 5 温备件门的描述规则

规则	x_1	x_2	x_3	y		
				$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$	$\delta(t-t_3)$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	0	0	1
3	1	2	1	0	1	0
4	1	2	2	0	1	1
5	2	1	1	1	0	0
6	2	1	2	1	0	1
7	2	2	1	1	1	0
8	1	2	3	0	0	1
9	1	3	2	0	1	0
10	2	1	3	0	0	1
11	2	3	1	0	1	0
12	3	1	2	1	0	0
13	3	2	1	1	0	0

对比表 2~5 与表 1 可见,连续时间 T-S 动态故障树可以通过连续时间 T-S 动态门及其描述规则描述任意形式的静、动态逻辑关系,相比 DUGAN 动态故障树,连续时间 T-S 动态故障树能够描述复杂的逻辑关系,无限逼近现实系统的失效行为,具有更好的适应性和灵活性,所以 DUGAN 动态门可以视为连续时间 T-S 动态门的特例。

1.3 连续时间 T-S 动态故障树算法

在构建连续时间 T-S 动态门及其描述规则的基础上,提出连续时间 T-S 动态故障树分析求解方法。

设下级事件 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 在时间 t_i 的瞬时故障率用 $\lambda(x_i^{[t_i]})$ 表示,其独立故障概率密度函数为 $f(x_i^{[t_i]})$,可由式(4)得到;用 $f_{(l)}(x_i^{[t_i]})$ 表示 x_i 在规则 l 下的故障概率密度函数,则规则执行度 $P_{(l)}^*$ 为

$$P_{(l)}^* = \prod_{i=1}^n f_{(l)}(x_i^{[t_i]}) \quad (3)$$

$$f(x_i^{[t_i]}) = \lambda(x_i^{[t_i]}) \exp\left(\int_0^{t_i} -\lambda(x_i^{[\tau]}) d\tau\right) \quad (4)$$

式中,若故障率为 λ_i ,则(4)可表示为

$$f(x_i^{[t_i]}) = \lambda_i \exp\left(\int_0^{t_i} -\lambda_i d\tau\right) \quad (5)$$

若下级事件 x_i 之间没有故障相关性,即下级事件 x_i 中任意一个故障不会影响其他下级事件故障概率变化,则在规则 l 中 x_i 的故障概率密度函数 $f_{(l)}(x_i^{[t_i]}) = f(x_i^{[t_i]})$ 。

若连续时间 T-S 动态门中的下级事件间会因故障时序性而引起故障率变化时,则 x_i 在规则 l 下的故障概率密度函数 $f_{(l)}(x_i^{[t_i]})$ 为

$$f_{(l)}(x_i^{[t_i]}) = \lambda_{(l)}(x_i^{[t_i]}) \exp\left(\int_0^{t_i} -\lambda_{(l)}(x_i^{[\tau]}) d\tau\right) \quad (6)$$

式中, $\lambda_{(l)}(x_i^{[t_i]})$ 表示规则 l 中下级事件 x_i 在时间 t_i

的瞬时故障率。

上级事件 y 的故障概率密度函数为

$$f_y(t) = \sum_{l=1}^r \int_{\Omega_l} \cdots \int_{\Omega_l} \delta(t-t_i) P_{(l)}^*(y^{[t_i]}) dt_1 dt_2 \cdots dt_n \quad (7)$$

其中,规则数 $r = n! + 1 + \sum_{i=1}^{n-2} C_n^{n-i} ((i+1)!) ; \Omega_l$ 为规则

l 下的积分区间,积分区间 $\Omega_l (l=1, 2, \dots, r)$ 分别为 $\Omega_1 \{(t_1, t_2, \dots, t_n) | 0 < t_1 = t_2 = \dots = t_n\}$ 、 $\Omega_2 \{(t_1, t_2, \dots, t_n) | 0 < t_1 = t_2 = \dots = t_{n-1} < t_n\}$ 、 $\dots$ 、 $\Omega_r \{(t_1, t_2, \dots, t_n) | t_1 > t_2 > \dots > t_n > 0\}$ 。

上级事件 y 的故障概率分布函数为

$$F_y(t) = \int_0^t f_y(t) dt \quad (8)$$

2 连续时间 T-S 动态故障树分析方法的验证与应用

为验证连续时间 T-S 动态故障树分析方法的可行性,将其与三种常用的解算 DUGAN 动态故障树分析方法(基于 Markov 链的、基于连续时间贝叶斯网络的、基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法)和离散时间 T-S 动态故障树分析方法进行对比分析。

2.1 与基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法对比

Markov 链是一种常用的求解 DUGAN 动态故障树的,也是代表性的方法。这里,将本文的连续时间 T-S 动态故障树分析方法与基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法进行对比,验证所提算法。

2.1.1 液压系统

图 3 为某液压系统的 DUGAN 动态故障树,该故障树中 $G_1 \sim G_3$ 门分别是优先与门、与门、或门, y_1 、 y_2 是中间事件, y_3 为顶事件,基本事件 $x_1 \sim x_4$ 的故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_4 (10^{-6}/h)$ 分别为 12、2、6、8。

图 3 液压系统 DUGAN 动态故障树

2.1.1.1 基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析

基于 Markov 链求解 DUGAN 动态故障树分析过程。首先系统分析与故障分析, 得到系统故障路径, 进而根据故障路径建立 Markov 状态转移图, 然后对 Markov 状态转移矩阵定量分析, 可得对应的 Markov 链和 s 行 s 列的状态转移速率矩阵 T , 其中 s 为 Markov 状态转移图中状态个数, 再列出 Markov 链对应的微分方程, 如式(9)所示, 并以 $P(0)=(1, 0, \dots, 0)^T$ 为初始值, 代入式(9), 通过求解微分方程组, 得到 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $P_{s-1}(t)$ 、 $P_s(t)$, 最后将基本事件 x_i 的故障率 λ_i 及任务时间 T_M 代入 $P_s(t)$ 得系统故障概率。

$$\frac{dP(t)}{dt} = T^T P(t) \quad (9)$$

式中, $P(t)=(P_1(t) \ P_2(t) \ \dots \ P_{s-1}(t) \ P_s(t))^T$, $P_1(t) \sim P_{s-1}(t)$ 和 $P_s(t)$ 分别表示系统在时刻 t 处于状态 1~状态($s-1$)、状态 Fa(即故障状态)的可能性。

由上述液压系统的逻辑关系得到故障路径, 从而建立 Markov 状态转移图, 如图 4 所示。

图 4 Markov 状态转移图

由图 4 可得状态转移速率矩阵 T , 将状态转移矩阵 T 及初始值 $P(0)=(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 代入式(9)得到 $P_1(t) \sim P_{11}(t)$ 的解析解, 即系统处在状态 1~11 的可能性, 再将基本事件 $x_1 \sim x_4$ 的故障率和任务时间 $T_M=5\ 000\text{ h}$ 代入 $P_{11}(t)$, 求得顶事件 y_3 的故障概率 $P_{11}(T_M)=0.058\ 241$ 。

2.1.1.2 连续时间 T-S 动态故障树分析

在此, 用连续时间 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解。将图 3 所示的 DUGAN 动态故障树转化为如图 5 所示的 T-S 动态故障树, 其中 $G_1 \sim G_3$ 门表示的逻辑关系分别为优先与门、与门、或门。

图 5 T-S 动态故障树

连续时间下 $G_1 \sim G_3$ 门对应的描述规则如表 6~8 所示。

表 6 连续时间下 G_1 门的描述规则

规则	x_2	x_3	y_1	
			$\delta(t-t_2)$	$\delta(t-t_3)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	0	0

表 7 连续时间下 G_2 门的描述规则

规则	y_1	x_4	y_2	
			$\delta(t-t_{y_1})$	$\delta(t-t_4)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	1	0

表 8 连续时间下 G_3 门的描述规则

规则	x_1	y_2	y_3	
			$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_{y_2})$
1	1	1	1	1
2	1	2	1	0
3	2	1	0	1

由连续时间 T-S 动态故障树分析方法可求得液压系统在任务时间 $T_M=5\ 000\text{ h}$ 时的故障概率为 0.058 241。

可以看出, 由连续时间 T-S 动态故障树分析方法求解的结果与基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法所得的结果相同, 验证了所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法的可行性。而且, 与基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法相比, 所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法在分析求解过程中可以直接定量分析, 无需借助 Markov 链, 且能反映系统故障概率变化趋势。

2.1.2 处理器系统

文献[33]中的 DUGAN 动态故障树如图 6 所示, $G_1 \sim G_3$ 门分别是冷备件门、冷备件门、优先与门,

基本事件 $x_1 \sim x_4$ 的故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_4 (10^{-4}/\text{h})$ 分别为 2.3、1.1、2.5、1.2, y_1 、 y_2 为中间事件, y_3 为顶事件。

图 6 处理器系统 DUGAN 动态故障树

2.1.2.1 基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析

首先系统分析与故障分析, 可得到故障路径。进而根据故障路径, 建立 Markov 状态转移图, 通过状态转移图可得状态转移速率矩阵, 通过求解微分方程组, 最后将任务时间 $T_M = 1\,000\text{ h}$ 及基本事件 $x_1 \sim x_4$ 的故障率代入求解, 可得系统故障概率为 $7.491\,0 \times 10^{-5}$, 详见文献[33]。

2.1.2.2 连续时间 T-S 动态故障树分析

这里, 用连续时间 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解, 将图 6 的 DUGAN 动态故障树转化为如图 7 所示的 T-S 动态故障树。

图 7 T-S 动态故障树

连续时间下 $G_1 \sim G_3$ 门对应的描述规则如表 9~11 所示。

表 9 G_1 门的事件发生规则

规则	x_1	x_2	y_1	
			$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	0	0

表 10 G_2 门的事件发生规则

规则	x_3	x_4	y_2	
			$\delta(t-t_3)$	$\delta(t-t_4)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	0	0

表 11 G_3 门的事件发生规则

规则	y_1	y_2	y_3	
			$\delta(t-t_{y_1})$	$\delta(t-t_{y_2})$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	0	0

下级事件 x_2 为冷备件, 即当主件 x_1 故障后才进入工作状态, 则可由式(4)求得下级事件 x_1 在规则 l 中概率密度函数 $f(x_1^{[t_1]})$; 由式(6)求得下级事件 x_2 在规则 l 中概率密度函数 $f_{(l)}(x_2^{[t_2]})$ 。

同理, 下级事件 x_3 在规则 l 中概率密度函数 $f(x_3^{[t_3]})$; 下级事件 x_4 在规则 l 中概率密度函数 $f_{(l)}(x_4^{[t_4]})$ 。

G_3 门为优先与门, 则下级事件 y_1 、 y_2 在规则 l 中概率密度函数可由式(4)求得。

由连续时间 T-S 动态故障树分析方法可得上述系统的故障概率随时间变化曲线如图 8 所示, 利用基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法、连续时间 T-S 动态故障树分析方法求得该系统的故障概率均为 $7.491\,0 \times 10^{-5}$ 。

图 8 处理器系统故障概率随时间的变化曲线

可以看出, 连续时间 T-S 动态故障树分析方法求的系统故障概率, 与基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法求得结果相同, 而且, 由连续时间 T-S 动态故障树分析方法可反映出系统故障概率随时间变化趋势。因而, 连续时间 T-S 动态故障树分析方法是可行的, 且更有优势。

2.2 与基于连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法对比

基于连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法^[30], 引入单位阶跃函数和冲激函数构造条件概率密度函数, 求解上级事件故障概率密度函数, 进而得到系统故障概率, 是求解 DUGAN 动态故障树常用方法之一。这里, 将本文的连续时间 T-S 动态故障树分析方法与基于连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法进行对比, 验证所提算法。

2.2.1 基于连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析

心脏辅助系统 CPU 模块的 DUGAN 动态故障树如图 9 所示,其中 $G_1 \sim G_3$ 门分别为或门、温备件门、功能相关门,基本事件 $x_1 \sim x_4$ 分别表示交叉开关、监控系统、主用 CPU、备用 CPU,其故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_4(10^{-6}/h)$ 分别为 1、1、2、2,休眠因子 $\alpha=0.5$ 。

图 9 心脏辅助系统 CPU 模块 DUGAN 动态故障树

将图 9 所示的 DUGAN 动态故障树转化为贝叶斯网络,由单位阶跃函数和冲激函数构造出子节点的条件概率密度函数,进一步得到贝叶斯网络的联合概率密度函数,然后对其积分可得到子节点的边缘概率密度函数及概率分布函数,最后将任务时间 $T_M=100\ 000\ h$ 及各基本事件故障率代入叶节点 y_3 的概率分布函数,从而得到系统故障概率为 0.202 101,详见文献[30]。

2.2.2 连续时间 T-S 动态故障树分析

这里,用连续时间 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解,将图 9 的 DUGAN 动态故障树转化为如图 10 所示的 T-S 动态故障树。

图 10 T-S 动态故障树

连续时间下 $G_1 \sim G_3$ 门对应的描述规则如表 12~14 所示。

表 12 G_1 门的事件发生规则

规则	x_1	x_2	y_1	
			$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$
1	1	1	1	1
2	1	2	1	0
3	2	1	0	1

表 13 G_2 门的事件发生规则

规则	x_3	x_4	y_2	
			$\delta(t-t_3)$	$\delta(t-t_4)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	1	0

表 14 G_3 门的事件发生规则

规则	y_1	y_2	y_3	
			$\delta(t-t_{y_1})$	$\delta(t-t_{y_2})$
1	1	1	1	1
2	1	2	1	0
3	2	1	0	1

由连续时间 T-S 动态故障树分析方法可得心脏辅助系统 CPU 模块的故障概率为 0.202 101。

可以看出,连续时间 T-S 动态故障树分析方法求的系统故障概率,与基于连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法求得结果相同。与基于连续时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法相比,所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法在分析求解过程中可以直接定量分析,无需借助连续时间贝叶斯网络。因而,连续时间 T-S 动态故障树分析方法是可行的,且更有优势。

2.3 与基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法对比

基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法^[34],利用贝叶斯网络能够正向推理叶节点失效概率、反向推理根节点后验概率的优势评估系统可靠性,是一种求解 DUGAN 动态故障树常用方法。在基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析的传统方法基础上,文献[17]利用复合梯形积分方法分析传统方法的计算误差,修正优先与门、备件门等动态门的条件概率表的下级事件时序关系描述,相对于传统方法,文献[17]改良方法减小了分析计算误差。这里,将本文的连续时间 T-S 动态故障树分析方法与基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析的改良方法进行对比,验证所提算法。

2.3.1 基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析

文献[17]中针对测量系统,建造 DUGAN 动态故障树并将其转化为贝叶斯网络,当任务时间 $T_M=1\ 000\ h$,且 $m=5、10、50、100、500、1\ 000$ 时,利用离散时间贝叶斯网络分析方法求得该系统故障概率如表 19 所示,详见文献[17]。

2.3.2 连续时间 T-S 动态故障树分析

这里, 用连续时间 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解。建造测量系统如图 11 所示的 T-S 动态故障树, 其中 $G_1 \sim G_6$ 门表示逻辑关系分别是优先与门、优先与门、冷备件门、与门、与门、或门, 基本事件 $x_1 \sim x_6$ 对应系统的密封胶、两个关键电子元器件、红外传感器、主用接口、备用接口, 其故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_6 (10^{-3}/h)$ 分别为 2、5、8、3、1、4, $y_1 \sim y_5$ 为中间事件, y_6 为顶事件。

图 11 T-S 动态故障树

因 G_1 、 G_2 门中同时有下级事件 x_1 , 且 G_1 、 G_2 门中的上级事件 y_1 、 y_2 又作为 G_4 门中的下级事件, 则可将 G_1 、 G_2 、 G_4 门描述规则组合, 如表 15 所示, G_3 、 G_5 、 G_6 门描述规则如表 16~18 所示。

表 15 连续时间下 G_1 、 G_2 、 G_4 门组合的描述规则

规则	x_1	x_2	x_3	y_4		
				$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_2)$	$\delta(t-t_3)$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	0	0	1
3	1	2	1	0	1	0
4	1	2	2	0	1	1
5	2	1	1	0	0	0
6	2	1	2	0	0	0
7	2	2	1	0	0	0
8	1	2	3	0	0	1
9	1	3	2	0	1	0
10	2	1	3	0	0	0
11	2	3	1	0	0	0
12	3	1	2	0	0	0
13	3	2	1	0	0	0

由连续时间 T-S 动态故障树分析方法可得测量系统的故障概率随时间变化曲线如图 12 所示, 利用传统的离散时间贝叶斯网络方法、离散时间贝叶斯

网络改良方法及连续时间 T-S 动态故障树分析方法所求得测量系统的故障概率如表 19 所示。

表 16 连续时间下 G_3 门的描述规则

规则	x_5	x_6	y_3	
			$\delta(t-t_5)$	$\delta(t-t_6)$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	1	0

表 17 连续时间下 G_5 门的描述规则

规则	x_4	y_3	y_5	
			$\delta(t-t_4)$	$\delta(t-t_{y_3})$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	1	0

表 18 连续时间下 G_6 门的描述规则

规则	y_4	y_5	y_6	
			$\delta(t-t_{y_4})$	$\delta(t-t_{y_5})$
1	1	1	1	1
2	1	2	1	0
3	2	1	0	1

图 12 测量系统故障概率随时间的变化曲线

表 19 测量系统的故障概率

基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法			
Markov 链 ^[17]	任务时间划分段 m	离散时间贝叶斯网络传统方法 ^[17]	离散时间贝叶斯网络改良方法 ^[17]
0.557 203	5	0.315 01	0.549 81
	10	0.421 37	0.555 06
	50	0.527 98	0.557 71
	100	0.542 48	0.557 18
	500	0.554 21	0.557 202
	1000	0.555 72	0.557 203
		本文方法	
		0.557 203	

从表 19 可以看出, 连续时间 T-S 动态故障树分析方法求得的系统故障概率, 与基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析的改良方法求得结果一致。基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动

态故障树分析的传统方法及改良方法的误差, 随着任务时间划分段数 m 的增加会越来越小, 越来越接近于连续时间 T-S 动态故障树分析方法的结果, 但分析计算量、复杂度增大。而且, 相对于基于离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法, 连续时间 T-S 动态故障树分析方法无需借助于贝叶斯网络, 且能够得到更多的可靠性信息, 例如, 图 12 可以反映出系统故障概率随时间变化趋势。因而, 连续时间 T-S 动态故障树分析方法是可行性的, 且更有优势。

2.4 与离散时间 T-S 动态故障树分析方法对比

相对于 DUGAN 动态故障树分析方法, 离散时间 T-S 动态故障树分析方法^[32]增强了故障树描述静、动态逻辑的能力, 解决了 DUGAN 动态故障树分析方法无法描述系统中任意的静、动态失效行为的问题。这里, 将本文的连续时间 T-S 动态故障树分析方法与离散时间 T-S 动态故障树分析方法进行对比, 验证所提算法。

2.4.1 离散时间 T-S 动态故障树分析

文献[32]中液压系统 T-S 动态故障树如图 13 所示, 其中 $G_1 \sim G_3$ 门表示的逻辑关系分别是或门、优先与门、或门, 基本事件 $x_1 \sim x_5$ 的故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_5$ 分别为 $2 \times 10^{-6}/\text{h}$ 、 $2 \times 10^{-6}/\text{h}$ 、 $3 \times 10^{-6}/\text{h}$ 、 $3 \times 10^{-6}/\text{h}$ 、 $1 \times 10^{-6}/\text{h}$, y_1 、 y_2 为中间事件, y_3 为顶事件。

图 13 T-S 动态故障树

任务时间 $T_M = 10\,000\text{ h}$, 任务时间划分段数 $m = 5$ 、10、15、20、25、30 时, 构建描述 $G_1 \sim G_5$ 门的事件发生规则, 运用基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的离散时间 T-S 动态故障树分析求解计算方法, 先计算 T-S 动态门的输入规则执行度, 再计算上级事件的故障概率。

2.4.2 连续时间 T-S 动态故障树分析

这里, 用连续时间 T-S 动态故障树分析方法

进行分析求解。 $G_1 \sim G_3$ 门描述规则如表 20~表 22 所示。

表 20 连续时间下 G_1 门的描述规则

规则	x_2	x_3	y_1	
			$\delta(t-t_2)$	$\delta(t-t_3)$
1	1	1	1	1
2	1	2	1	1
3	2	1	0	1

表 21 连续时间下 G_2 门的描述规则

规则	x_1	y_1	y_2	
			$\delta(t-t_1)$	$\delta(t-t_{y_1})$
1	1	1	1	1
2	1	2	0	1
3	2	1	0	0

表 22 连续时间下 G_3 门的描述规则

规则	y_2	x_4	x_5	y_3		
				$\delta(t-t_{y_2})$	$\delta(t-t_4)$	$\delta(t-t_5)$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	1	1	0
3	1	2	1	1	0	1
4	1	2	2	1	0	0
5	2	1	1	0	1	1
6	2	1	2	0	1	0
7	2	2	1	0	0	1
8	1	2	3	1	0	0
9	1	3	2	1	0	0
10	2	1	3	0	1	0
11	2	3	1	0	0	1
12	3	1	2	0	1	0
13	3	2	1	0	0	1

利用离散时间 T-S 动态故障树分析方法、连续时间 T-S 动态故障树分析方法所求得液压系统的故障概率如表 23 所示。

表 23 液压系统的故障概率

Markov 链 ^[32]	离散时间 T-S 动态故障树分析方法 ^[32]		本文方法
	任务时间划分段数 m	T-S 动态故障树	
0.039 672	5	0.039 579	0.039 672
	10	0.039 626	
	15	0.039 641	
	20	0.039 649	
	25	0.039 654	
	30	0.039 657	

从表 23 可以看出, 连续时间 T-S 动态故障树分析方法求得的系统故障概率, 与基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法、离散时间 T-S 动态故障树分析方法求得结果一致。离散时间 T-S 动态

故障树分析方法的误差,随着任务时间划分段数 m 的增加会越来越小,越来越接近于连续时间 T-S 动态故障树分析方法的结果,但分析计算量和复杂度增大。而且,相对于基于 Markov 链的 DUGAN 动态故障树分析方法,无需借助 Markov 链,而是直接求解;相对于离散时间 T-S 动态故障树分析方法,连续时间 T-S 动态故障树分析方法能够得到系统故障概率随时间变化趋势。因而,连续时间 T-S 动态故障树分析方法是可行性的,且更有优势。

3 结 论

(1) 针对离散时间 T-S 动态故障树分析方法存在分析计算误差、且不能反映系统可靠度变化趋势的问题,提出了连续时间 T-S 动态故障树分析方法。定义描述静、动态失效行为的连续时间 T-S 动态门,提出基于下级事件时序关系及事件发生冲激函数描述与上级事件发生可能性的连续时间 T-S 动态门描述规则构建方法,利用冲激函数冲激点的积分特性,进而提出基于描述规则执行度与上级事件发生可能性及冲激函数积分的上级事件故障概率密度函数和故障概率分布函数的分析计算方法。

(2) 将所提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法分别与基于 Markov 链、连续时间贝叶斯网络、离散时间贝叶斯网络的 DUGAN 动态故障树分析方法以及离散时间 T-S 动态故障树分析方法进行对比,验证了所提方法可行,且更有优势。所提方法相对于 DUGAN 动态故障树分析方法更强的失效行为描述能力,解决了离散时间 T-S 动态故障树分析方法的分析计算误差问题,且能反映系统故障概率变化趋势。

(3) 由课题组前期提出的离散时间 T-S 动态故障树分析方法^[32]和本文提出的连续时间 T-S 动态故障树分析方法就构成了 T-S 动态故障树分析方法^[33]。T-S 动态故障树可以刻画任意形式的静、动态失效行为,相对于静态故障树和 DUGAN 动态故障树,T-S 动态故障树更为通用化、具有更好的泛化能力,传统故障树和 DUGAN 动态故障树可看作是 T-S 动态故障树的某种特例。

参 考 文 献

- [1] VOLK M, JUNGES S, KATOEN J P. Fast dynamic fault tree analysis by model checking techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1): 370-379.
- [2] 李垚,朱才朝,宋朝省,等. 风电机组液压系统动态故障树的可靠性建模与评估[J]. 太阳能学报, 2018, 39(12): 3584-3593.
- LI Yao, ZHU Caichao, SONG Chaosheng, et al. Reliability modeling and assessment of dynamic fault tree for hydraulic system of wind turbines[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2018, 39(12): 3584-3593.
- [3] 冯芬玲, 阎美好. 基于 BDD 的铁路快运货物损失风险评估[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 48-54.
- FENG Fenling, YAN Meihao. Risk evaluation for railway express cargo loss based on BDD[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 48-54.
- [4] RUIJTERS E, STOELINGA M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools[J]. Computer Science Review, 2015, 15-16(3): 29-62.
- [5] 姚成玉, 陈东宁. 基于最小割集综合排序的液压系统故障定位方法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(11): 1357-1361.
- YAO Chengyu, CHEN Dongning. Fault localization method of hydraulic system based on minimum cut sets' comprehensive rank[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(11): 1357-1361.
- [6] SONG H, ZHANG H Y, CHAN C W. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system[J]. Soft Computing, 2009, 13(1): 31-40.
- [7] 姚成玉, 赵静一. 基于 T-S 模型的液压系统模糊故障树分析方法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(16): 1913-1917.
- YAO Chengyu, ZHAO Jingyi. Research on fuzzy fault tree analysis method for hydraulic system based on T-S model[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(16): 1913-1917.
- [8] DONG L, SONG H, LIU W, et al. The application of T-S fuzzy fault tree analysis in satellite attitude control system[C]// IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics, July 25-27, 2012, Beijing, China. IEEE, 2012: 208-213.
- [9] 孙利娜, 黄宁, 仵伟强, 等. 基于 T-S 模糊故障树的多态系统性能可靠性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 191-198.
- SUN Lina, HUANG Ning, WU Weiqiang, et al. Performance reliability of polymorphic systems by fuzzy fault tree based on T-S model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 191-198.
- [10] 罗彦斌, 陈建勋, 王梦恕. 基于 T-S 模糊故障树理论的公路隧道冻害分析方法[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4): 55-60.
- LUO Yanbin, CHEN Jianxun, WANG Mengshu. Method for analyzing the highway tunnel freeze injury based on the T-S fuzzy fault tree theory[J]. Journal of Beijing

- Jiaotong University, 2012, 36(4): 55-60.
- [11] 姚成玉, 陈东宁, 王斌. 基于 T-S 故障树和贝叶斯网络的模糊可靠性评估方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 193-201.
YAO Chengyu, CHEN Dongning, WANG Bin. Fuzzy reliability assessment method based on T-S fault tree and Bayesian network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 193-201.
- [12] 李莎莎, 崔铁军, 马云东. 基于空间故障树理论的系统可靠性评估方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 68-74.
LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong. Study on assessment method of system reliability based on space fault tree theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 68-74.
- [13] 姚成玉, 吕军, 陈东宁, 等. 凸模型 T-S 故障树及重要度分析方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 184-192.
YAO Chengyu, LÜ Jun, CHEN Dongning, et al. Convex model T-S fault tree and importance analysis methods[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 184-192.
- [14] DUGAN J B, BAVUSO S J, BOYD M A. Fault trees and sequence dependencies[J]. Microelectronics Reliability, 1991, 31(5): 286-293.
- [15] WALKER M, PAPADOPOULOS Y. Qualitative temporal analysis: Towards a full implementation of the fault tree handbook[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(10): 1115-1125.
- [16] 吴奇烜, 马建峰, 孙聪, 等. 针对扩展动态故障树的约束分析方法[J]. 通信学报, 2017, 38(9): 159-166.
WU Qixuan, MA Jianfeng, SUN Cong, et al. Constraint analysis for extended dynamic fault tree[J]. Journal on Communications, 2017, 38(9): 159-166.
- [17] 兰杰, 袁宏杰, 夏静. 基于离散时间贝叶斯网络的动态故障树分析的改良方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 948-953.
LAN Jie, YUAN Hongjie, XIA Jing. Improve method for dynamic fault tree analysis based on discrete-time Bayesian network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(4): 948-953.
- [18] BOUDALI H, CROUZEN P, STOELINGA M. Dynamic fault tree analysis using input/output interactive Markov chains[C]// 37th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, June 25-28, 2007, Edinburgh, UK. IEEE, 2007: 708-717.
- [19] YEVKIN O. An efficient an efficient approximate Markov chain method in dynamic fault tree analysis[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2016, 32: 1509-1520.
- [20] 朱正福, 李长福, 何恩山, 等. 基于马尔可夫链的动态故障树分析方法[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1104-1107.
ZHU Zhengfu, LI Changfu, HE Enshan, et al. The dynamic fault tree analysis method based on Markov chain[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9): 1104-1107.
- [21] MANNO G, CHIACCHIO F, COMPAGNO L, et al. MatCarloRe: An integrated FT and Monte Carlo simulink tool for the reliability assessment of dynamic fault tree[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(12): 10334-10342.
- [22] 孙东旭, 杨媛媛, 王红春, 等. 面向航电计算平台的多态动态故障树分析方法[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(5): 12-20.
SUN Dongxu, YANG Yuanyuan, WANG Hongchun, et al. Multi-state dynamic fault tree analysis method for avionics computing platform[J]. Microelectronics and Computer, 2017, 34(5): 12-20.
- [23] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 基于动态贝叶斯网络的某控制单元可靠性分析[J]. 航空兵器, 2017, (5): 83-88.
LI Zhiqiang, XU Tingxue, GU Junyuan, et al. Reliability analysis of a control unit based on dynamic Bayesian network[J]. Aero Weaponry, 2017, (5): 83-88.
- [24] 魏亚荣, 李长俊, 吴瑕. 基于贝叶斯网络的页岩气集输管道失效概率计算方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1): 121-127.
WEI Yarong, LI Changjun, WU Xia. Study on calculation method of failure probability for gathering pipeline of shale gas based on Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 121-127.
- [25] FAKHRAVAR D, KHAKZAD N, RENIERS G, et al. Security vulnerability assessment of gas pipelines using discrete-time Bayesian network[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 111: 714-725.
- [26] GE D, LIN M, YANG Y, et al. Quantitative analysis of dynamic fault trees using improved sequential binary decision diagrams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 289-299.
- [27] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 135-141.
XIONG Xiaoping, TAN Jiancheng, LIN Xiangning. Reliability analysis of communication system in substation based on dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 135-141.
- [28] 余建星, 任杰, 杨政龙, 等. 基于动态故障树法的深海采油树系统定量风险评估[J]. 中国海洋平台, 2019, 34(1): 72-78.
YU Jianxing, REN Jie, YANG Zhenglong, et al. Quantitative risk analysis of deep-sea christmas tree

- system based on dynamic fault tree[J]. China Offshore Platform, 2019, 34(1): 72-78.
- [29] 房丙午, 黄志球, 李勇, 等. 基于贝叶斯网络的复杂系统动态故障树定量分析方法[J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1234-1239.
- FANG Bingwu, HUANG Zhiqiu, LI Yong, et al. Quantitative analysis method of dynamic fault tree of complex system using Bayesian network[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1234-1239.
- [30] BOUDALI H, DUGAN J B. A continuous-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2006, 55(1): 86-97.
- [31] 李佩昌, 袁宏杰, 兰杰, 等. 基于顺序二元决策图的动态故障树分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(1): 167-175.
- LI Peichang, YUAN Hongjie, LAN Jie, et al. Dynamic fault tree analysis using sequential binary decision diagrams[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(1): 167-175.
- [32] 姚成玉, 饶乐庆, 陈东宁, 等. T-S 动态故障树分析方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 17-32.
- YAO Chengyu, RAO Leqing, CHEN Dongning, et al. T-S dynamic fault tree analysis method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(16): 17-32.
- [33] 王家序, 周青华, 肖科, 等. 不完全共因失效系统动态故障树模型分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 1062-1067.
- WANG Jiaxu, ZHOU Qinghua, XIAO Ke, et al. Dynamic fault tree model analysis of systems subjected to incomplete common-cause failure[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 1062-1067.
- [34] BOUDALI H, DUGAN J B. A discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87(3): 337-349.
- [35] 姚成玉, 陈东宁. T-S 故障树理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- YAO Chengyu, CHEN Dongning. T-S fault tree theory and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.

作者简介: 姚成玉(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士后, 教授。主要研究方向为系统可靠性及故障诊断。

E-mail: chyyao@ysu.edu.cn

王传路, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动态故障树。

陈东宁, 女, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为可靠性分析及优化。

魏星, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动态故障树。

吕世君, 男, 1975 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为系统可靠性。