

DOI: 10.3901/JME.2019.16.017

T-S 动态故障树分析方法*

姚成玉¹ 饶乐庆^{2,3} 陈东宁^{2,3} 侯鑫^{2,3} 吕世君^{2,3} 于传宇^{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: 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并用与、或门等传统逻辑门描述静态失效行为, 动态子树用优先与门、功能相关门、顺序相关门、备件门等动态逻辑门描述动态失效行为。相对于传统故障树, T-S 故障树可以刻画任意形式的组合、多态等静态失效行为, 但仍不能刻画系统的动态失效行为。为进一步增强故障树描述静、动态失效逻辑的能力, 提出了 T-S 动态故障树分析方法, 首先定义并提出了描述静、动态逻辑关系的 T-S 动态门及描述 T-S 动态门的时间状态规则和事件发生规则构建方法, 进而提出了基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法。T-S 动态故障树的 T-S 动态门规则可无限逼近现实系统的失效行为, 不仅可以描述 DUGAN 动态门所刻画的动态失效行为, 还可以描述 DUGAN 动态门不能刻画的静、动态失效行为。最后, 将 T-S 动态故障树分析方法分别与离散时间贝叶斯网络、Markov 链和顺序二元决策图求解 DUGAN 动态故障树的方法进行对比, 验证了所提方法的可行性和计算的简便性。

关键词: 故障树; 动态故障树; T-S 动态故障树; T-S 动态门; T-S 动态门规则

中图分类号: TB114; TH137

T-S Dynamic Fault Tree Analysis Method

YAO Chengyu¹ RAO Leqing^{2,3} CHEN Dongning^{2,3} HOU Xin^{2,3}
LÜ Shijun^{2,3} YU Chuanyu^{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: DUGAN dynamic fault tree is composed of static subtree and dynamic subtree. The static subtree is traditional fault tree, which uses traditional logic gates such as AND, OR gate and so on to describe static failure behaviors. The dynamic subtree uses dynamic logic gates such as the priority AND gate, the functional dependency gate, the sequence enforcing gate, the spare gate and so on to describe dynamic failure behaviors. Compared with traditional fault tree, T-S fault tree can describe any combinational and multi-state static failure behaviors, but it still can not describe the system consisting of dynamic failure behaviors. To improve the ability to describe combination of any static and dynamic failure behaviors, T-S dynamic fault tree analysis method is proposed. First, T-S dynamic gate that describes static and dynamic logic relationship is defined and construction method of T-S dynamic gate rule including time state rule and event occurrence rule is proposed and T-S dynamic fault tree analysis and calculation method based on T-S dynamic gate input and output rules algorithm is proposed. T-S dynamic gate rule can infinitely approximate the failure behaviors of the real system. It can not only describe the dynamic failure behaviors described by DUGAN dynamic gates, but also describe the static and dynamic failure behaviors that DUGAN dynamic gates cannot describe. Finally the feasibility and calculation simplicity of

* 国家自然科学基金(51675460)、中国博士后科学基金(2017M621101)和河北省自然科学基金(E2016203306)资助项目。20181203 收到初稿, 20190611 收到修改稿

the proposed method are verified by comparing with discrete-time Bayesian networks, Markov chains and sequential binary decision diagrams solving DUGAN dynamic fault tree.

Key words: fault tree; dynamic fault tree; T-S dynamic fault tree; T-S dynamic gate; T-S dynamic gate rule

0 前言

故障树分析方法是一种用于可靠性分析^[1]、故障分析和诊断^[2]的基础性方法,得到了广泛的研究和应用^[3-4]。传统故障树分析方法用与、或门等传统逻辑门描述静态失效行为^[5],但对于失效机理复杂多样的系统,难以刻画全部的静态失效行为。针对传统故障树分析方法的上述不足,文献[6]提出了用于描述事件联系的以 T-S 模型规则为基础的 T-S 门,进而提出了 T-S 故障树分析方法。文献[7]验证了 T-S 故障树分析方法的可行性,揭示了 T-S 故障树可以刻画任意形式的多态、组合等静态失效行为, T-S 故障树更为通用化,传统故障树是 T-S 故障树的某种特例,仅限于与、或等传统逻辑门所描述的失效逻辑。在 T-S 故障树的基础上,文献[8]提出了 T-S 结构重要度、T-S 概率重要度和 T-S 关键重要度;文献[9]提出了 T-S 模糊重要度和 T-S 状态重要度;文献[10]提出了 T-S 凸模型重要度、T-S 凸模型关键重要度;文献[11]提出了一种分析系统故障多态下的性能可靠性方法。

实际系统不仅存在静态逻辑关系,还存在动态逻辑关系,传统故障树和 T-S 故障树是静态故障树,均无法对实际系统中存在的时序性、相关性、顺序性和冗余性等动态特性进行刻画分析^[12-13]。DUGAN 等^[14]针对传统故障树无法描述动态逻辑关系的问题,对传统故障树进行延伸,提出优先与门、功能相关门、顺序相关门、备件门等动态逻辑门,创立了 DUGAN 动态故障树分析方法,解决了失效时序相关、功能相关、顺序相关等动态逻辑关系的刻画分析问题。自此, DUGAN 动态故障树分析方法被学者们研究和改进^[15-16]。国内外学者们主要从 DUGAN 动态故障树的算法^[17]和动态逻辑门拓展^[12]两个方面进行研究。在算法定量分析方面,代表性方法有基于 Markov 链、贝叶斯网络和顺序二元决策图等求解方法。文献[18-19]用 Markov 链分析求解动态故障树,能处理基本事件寿命服从指数分布的问题,但在分析过程中容易发生状态空间爆炸问题^[20]。文献[21]针对 Markov 链求解过程中出现的状态爆炸问题,提出借助贝叶斯网络的条件独立性来降低模型求解难度。文献[22]针对贝叶斯网络分析方法存在局部组合爆炸问题,提出一种基于 DUGAN 动态

故障树的贝叶斯网络精确推理算法,用一个确定性函数来替代条件概率表,避免了局部组合爆炸。文献[23-24]将 DUGAN 动态故障树转化为离散时间贝叶斯网络,利用离散时间贝叶斯网络求解 DUGAN 动态故障树。文献[25-26]提出利用顺序二元决策图求解 DUGAN 动态故障树,其求解结果精度与 Markov 链相同,并且可以处理基本事件寿命服从任意分布问题。在 DUGAN 动态门拓展方面,文献[27]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[28]提出不完全共因失效的概念,并引入了新的逻辑门结构对不完全共因失效行为进行有效描述,扩大了 DUGAN 动态门描述失效行为的范围。

然而, 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并用与、或门等传统逻辑门描述静态失效行为,动态子树用优先与门、功能相关门、顺序相关门、备件门等动态逻辑门描述动态失效行为,因此, DUGAN 动态故障树无法描述任意形式的静、动态失效行为。为此,本文对 T-S 故障树进行延伸,提出并创立 T-S 动态故障树分析方法,首先定义并提出描述静、动态逻辑关系的 T-S 动态门及其描述规则构建方法,进而提出基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法,最后将 T-S 动态故障树分析方法分别与离散时间贝叶斯网络、Markov 链和顺序二元决策图求解 DUGAN 动态故障树的方法进行对比。

1 T-S 动态故障树

针对传统故障树、T-S 故障树、DUGAN 动态故障树等现有故障树的不足,提出一种新的动态故障树分析方法——T-S 动态故障树分析方法。首先,定义并提出描述静、动态逻辑关系的 T-S 动态门及描述 T-S 动态门的时间状态规则和事件发生规则构建方法,进而,提出基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法。

1.1 分析流程

T-S 动态故障树由事件和 T-S 动态门组成,如图 1 所示, $x_1 \sim x_3$ 为基本事件, y_1 为中间事件, y_2 为顶事件, G_1 和 G_2 门为 T-S 动态门。

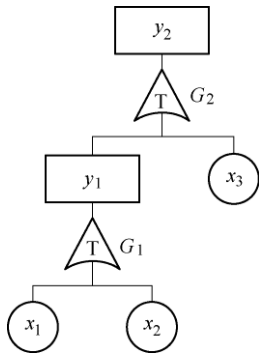


图1 T-S 动态故障树

T-S 动态故障树分析流程如图 2 所示。其分析流程如下。

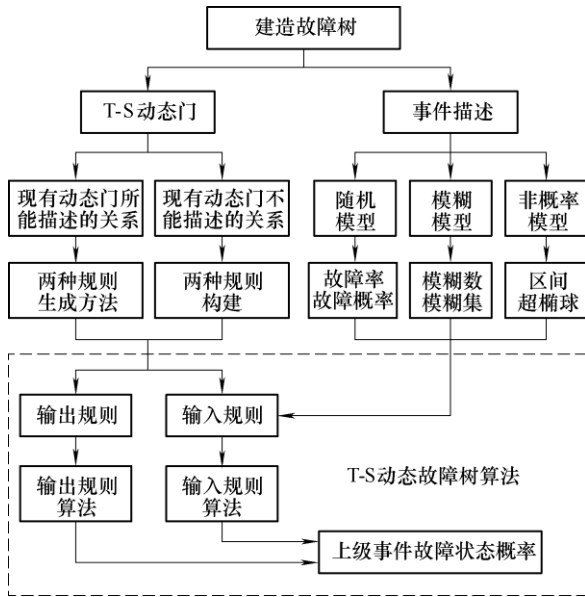


图2 T-S 动态故障树分析流程

首先，资料调研，失效机理分析，选择系统的顶事件，建造 T-S 动态故障树；其次，根据事件间的逻辑关系构建 T-S 动态门及其描述规则，对于现有 DUGAN 动态门能描述的动态逻辑关系，直接生成 T-S 动态门规则，现有 DUGAN 动态门不能完全描述的动态逻辑关系，则根据事件失效逻辑，构建相应的 T-S 动态门规则，从而得到能更全面、准确描述系统静、动态逻辑关系的 T-S 动态门规则，T-S 动态门规则由下级事件组成的输入规则和上级事件组成的输出规则构成，建立过程可以从下级事件各时间段的故障状态和下级事件故障状态发生的时间段两个角度构建，即时间状态规则和事件发生规则；然后，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；最后，基础数据或状态隶属度通过输入规则算法，得到输入规则执行可能性，输入规则执行可能性结合输出规则算法求得上级事件故障

状态概率，进而求得顶事件的故障状态概率。

1.2 T-S 动态门及其描述规则

1.2.1 T-S 动态门

针对系统中事件之间的时序性、相关性、顺序性和冗余性等动态特性，FUSSELL 等提出了优先与门^[29]，DUGAN 等提出了功能相关门、顺序相关门和备件门^[14]，本文统称为 DUGAN 动态门，如图 3 所示。

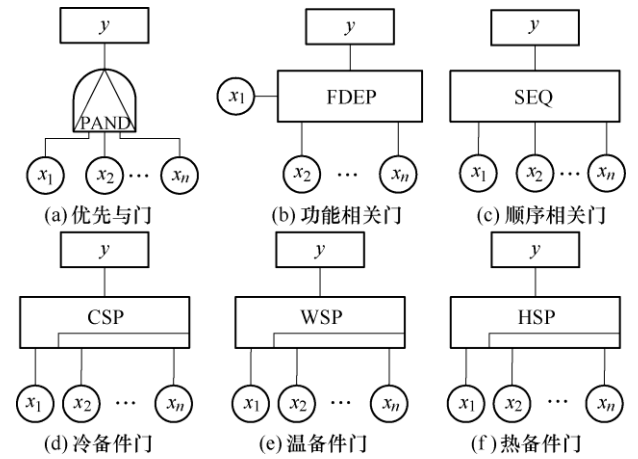


图3 DUGAN 动态门

DUGAN 动态门开创性地描述了系统的动态失效行为。DUGAN 动态门所能刻画的动态失效行为可以通过构建 T-S 动态门及其描述规则来实现，如图 4 所示。

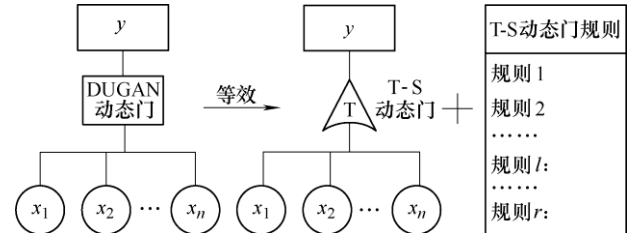


图4 等效于 DUGAN 动态门的 T-S 动态门及其描述规则

1.2.2 T-S 动态门的描述规则

假定任务时间 T_M 划分为 m 段，时间间隔 $\Delta = T_M/m$ ，由于存在任务时间内正常、任务时间外失效等情况，故将任务时间外也考虑其中，即将整个时间轴划分为 $m+1$ 段： $[0, \Delta)$, $[\Delta, 2\Delta)$, \dots , $[(m-1)\Delta, m\Delta)$, $[m\Delta, +\infty)$ ，分别记为时间段 1, 2, \dots , $m, m+1$ 。下级事件 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 在时间段 j_i ($j_i=1, 2, \dots, m, m+1$) 的故障状态为 $x_i^{[j_i]}$ ，上级事件 y 在时间段 j_y ($j_y=1, 2, \dots, m, m+1$) 的故障状态 $y^{[j_y]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ ($b_y=1, 2, \dots, k_y$)，且 $0 \leq S_y^{(1)} < S_y^{(2)} < \dots < S_y^{(k_y)} \leq 1$ 。

这里，提出两种 T-S 动态门规则的构建方法：时间状态规则和事件发生规则。

1.2.2.1 时间状态规则

T-S 动态门的时间状态规则是基于 T-S 动态门的逻辑关系、并通过列写下级事件 x_i 在各时间段的故障状态 $x_i^{[l]}$ 和上级事件 y 的故障状态为 $S_y^{(b_y)}$ 在各时间段的故障状态 $y^{[l]}$ 的发生可能性进行构建。时间状态规则中的规则 $l(l=1, 2, \dots, r)$ 可表述如下。

规则 l : 如果下级事件 x_1 在时间段 1, 2, \dots , m , $m+1$ 的故障状态为 $x_1^{[1]}, x_1^{[2]}, \dots, x_1^{[m]}, x_1^{[m+1]}$, x_2 在时间段 1, 2, \dots , $m, m+1$ 的故障状态为 $x_2^{[1]}, x_2^{[2]}, \dots, x_2^{[m]}, x_2^{[m+1]}$, \dots , x_n 在时间段 1, 2, \dots , $m, m+1$ 的故障状态为 $x_n^{[1]}, x_n^{[2]}, \dots, x_n^{[m]}, x_n^{[m+1]}$, 则上级事件 y 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性, 即上级事件 y 在时间段 1, 2, \dots , $m, m+1$ 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, \dots, y^{[m]}, y^{[m+1]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(l)}(y^{[1]})$, $P_{(l)}(y^{[2]})$, \dots , $P_{(l)}(y^{[m]})$, $P_{(l)}(y^{[m+1]})$ 。

规则 l 中, 下级事件 x_i 对应的规则为输入规则, 上级事件 $y = S_y^{(b_y)}$ 对应的规则为输出规则。因为上级事件 y 的故障状态为 $S_y^{(b_y)}$ 在整个时间轴上的不可靠度必然为 1, 故上级事件 y 的故障状态为 $S_y^{(b_y)}$ 发生可能性在整个时间轴上的概率和为 1, 即

$$P_{(l)}(y^{[1]}) + P_{(l)}(y^{[2]}) + \dots + P_{(l)}(y^{[m]}) + P_{(l)}(y^{[m+1]}) = 1$$

用 $S_i^{(a_i)} (a_i = 1, 2, \dots, k_i)$ 表示下级事件 x_i 的故障状态值, 且 $0 \leq S_i^{(1)} < S_i^{(2)} < \dots < S_i^{(k_i)} \leq 1$ 。系统为二态时即 $k_i = k_y = 2$, $S_i^{(a_i)} = 0, 1 (a_i = 1, 2)$, $S_y^{(b_y)} = 0, 1 (b_y = 1, 2)$ 分别表示下级事件 x_i 、上级事件 y 为正常状态、失效状态。当 $m=2, n=2$ 时, 规则总数 $r = (m+1)^n = 9$, 二态系统 T-S 动态门的时间状态规则如表 1 所示。

表 1 二态系统 T-S 动态门的时间状态规则

规则	x_1			x_2			$y = S_y^{(b_y)}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0	0	1	0	0	1	$P_{(1)}(y^{[1]})$	$P_{(1)}(y^{[2]})$	$P_{(1)}(y^{[3]})$
2	0	0	1	0	1	1	$P_{(2)}(y^{[1]})$	$P_{(2)}(y^{[2]})$	$P_{(2)}(y^{[3]})$
3	0	0	1	1	1	1	$P_{(3)}(y^{[1]})$	$P_{(3)}(y^{[2]})$	$P_{(3)}(y^{[3]})$
4	0	1	1	0	0	1	$P_{(4)}(y^{[1]})$	$P_{(4)}(y^{[2]})$	$P_{(4)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
l	$x_1^{[1]}$	$x_1^{[2]}$	$x_1^{[3]}$	$x_2^{[1]}$	$x_2^{[2]}$	$x_2^{[3]}$	$P_{(l)}(y^{[1]})$	$P_{(l)}(y^{[2]})$	$P_{(l)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
9	1	1	1	1	1	1	$P_{(9)}(y^{[1]})$	$P_{(9)}(y^{[2]})$	$P_{(9)}(y^{[3]})$

表 1 中每一行代表一条规则, 以第 1 行和第 2 行即规则 1 和规则 2 为例: 规则 1 表示下级事件 x_1 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0、1, x_2 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0、1, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(1)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[3]})$ 。

$P_{(1)}(y^{[3]})$; 规则 2 表示下级事件 x_1 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0、1, x_2 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、1、1, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(2)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[3]})$ 。

系统为多态时即 $k_i = k_y \geq 3$, $S_i^{(a_i)} = 0 \sim 1 (a_i = 1, 2, \dots, k_i)$, $S_y^{(b_y)} = 0 \sim 1 (b_y = 1, 2, \dots, k_y)$ 分别表示下级事件 x_i 、上级事件 y 为正常状态、正常与失效之间的中间状态、失效状态。当 $m=2, n=2$ 时, 多态系统 T-S 动态门的时间状态规则示例, 如表 2 所示。

表 2 多态系统 T-S 动态门的时间状态规则

规则	x_1			x_2			$y = S_y^{(b_y)}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.1	0.4	1	0	0.4	1	$P_{(1)}(y^{[1]})$	$P_{(1)}(y^{[2]})$	$P_{(1)}(y^{[3]})$
2	0.2	0.5	1	0	0.6	1	$P_{(2)}(y^{[1]})$	$P_{(2)}(y^{[2]})$	$P_{(2)}(y^{[3]})$
3	0.3	0.6	1	0.1	0.7	1	$P_{(3)}(y^{[1]})$	$P_{(3)}(y^{[2]})$	$P_{(3)}(y^{[3]})$
4	0.3	0.7	1	0.2	0.4	1	$P_{(4)}(y^{[1]})$	$P_{(4)}(y^{[2]})$	$P_{(4)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
l	$x_1^{[1]}$	$x_1^{[2]}$	$x_1^{[3]}$	$x_2^{[1]}$	$x_2^{[2]}$	$x_2^{[3]}$	$P_{(l)}(y^{[1]})$	$P_{(l)}(y^{[2]})$	$P_{(l)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
r	1	1	1	1	1	1	$P_{(r)}(y^{[1]})$	$P_{(r)}(y^{[2]})$	$P_{(r)}(y^{[3]})$

规则 1 表示下级事件 x_1 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0.1、0.4、1, x_2 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0.4、1, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(1)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[3]})$; 规则 2 表示下级事件 x_1 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0.2、0.5、1, x_2 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0.6、1, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(2)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[3]})$ 。

以三态系统为例, 即 $k_i = k_y = 3$, $S_i^{(a_i)} = 0, 0.5, 1 (a_i = 1, 2, 3)$, $S_y^{(b_y)} = 0, 0.5, 1 (b_y = 1, 2, 3)$ 分别表示下级事件 x_i 、上级事件 y 为正常状态、半故障状态、失效状态。当 $m=2, n=2$ 时, 三态系统 T-S 动态门的时间状态规则如表 3 所示。

规则 1 表示下级事件 x_1 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0、1, x_2 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0、1, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(1)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[3]})$; 规则 2 表示下级事件 x_1 在时间段 1、2、3 故障状态分别为 0、0、1, x_2 在时间段 1、2、3 的故障状态分别为 0、0.5、1, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(2)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[3]})$ 。

$y^{[2]}$ 、 $y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(2)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[3]})$ 。

表 3 三态系统 T-S 动态门的时间状态规则

规则	x_1			x_2			$y = S_y^{(b_y)}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0	0	1	0	0	1	$P_{(1)}(y^{[1]})$	$P_{(1)}(y^{[2]})$	$P_{(1)}(y^{[3]})$
2	0	0	1	0	0.5	1	$P_{(2)}(y^{[1]})$	$P_{(2)}(y^{[2]})$	$P_{(2)}(y^{[3]})$
3	0	0	1	0	1	1	$P_{(3)}(y^{[1]})$	$P_{(3)}(y^{[2]})$	$P_{(3)}(y^{[3]})$
4	0	0	1	0.5	0.5	1	$P_{(4)}(y^{[1]})$	$P_{(4)}(y^{[2]})$	$P_{(4)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
l	$x_1^{[1]}$	$x_1^{[2]}$	$x_1^{[3]}$	$x_2^{[1]}$	$x_2^{[2]}$	$x_2^{[3]}$	$P_{(l)}(y^{[1]})$	$P_{(l)}(y^{[2]})$	$P_{(l)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
36	1	1	1	1	1	1	$P_{(36)}(y^{[1]})$	$P_{(36)}(y^{[2]})$	$P_{(36)}(y^{[3]})$

DUGAN 动态故障树的现有研究仅考虑了二态而没有考虑多态, DUGAN 动态门限于二态系统。用 T-S 动态门可以替代 DUGAN 动态门, 下面以或门、优先与门为例进行说明, 并令 $m=2$, $n=2$ 。

当 T-S 动态门表示或门逻辑关系时, 即上级事件 y 的失效时间段发生在下级事件 x_1 、 x_2 先发生或同时发生的时间段, 因此, 上级事件 y 的故障状态为 1 时或门逻辑关系可用表 4 所示的时间状态规则描述。

表 4 或门的时间状态规则

规则	x_1			x_2			$y = 1$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	0
3	0	0	1	1	1	1	1	0	0
4	0	1	1	0	0	1	0	1	0
5	0	1	1	0	1	1	0	1	0
6	0	1	1	1	1	1	1	0	0
7	1	1	1	0	0	1	1	0	0
8	1	1	1	0	1	1	1	0	0
9	1	1	1	1	1	1	1	0	0

当 T-S 动态门表示优先与门逻辑关系时, 即上级事件 y 的失效时间段发生在下级事件 x_1 、 x_2 的失效时间段按先后或同时的顺序发生时 x_2 的失效时间段, 否则在任务时间外发生, 因此, 上级事件 y 的故障状态为 1 时优先与门逻辑关系可用表 5 所示的时间状态规则描述。

对比表 4 和表 5 与表 1 可见, 或门、优先与门是 T-S 动态门的某一种特例。T-S 动态故障树可以通过 T-S 动态门及一系列 T-S 动态门规则描述任意形式的静、动态逻辑关系, 相比 DUGAN 动态故障树, T-S 动态故障树能够描述复杂的故障机理, 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 T-S 动态门的特例, 仅限于现有 DUGAN 动态门所描述的失效逻辑。

表 5 优先与门的时间状态规则

规则	x_1			x_2			$y = 1$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	0	1
3	0	0	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	1	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	1	0
6	0	1	1	1	1	1	0	0	1
7	1	1	1	0	0	1	0	0	1
8	1	1	1	0	1	1	0	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	0	0

1.2.2.2 事件发生规则

T-S 动态门的事件发生规则是基于 T-S 动态门的逻辑关系、并通过列写下级事件 x_i 故障状态发生时间段 j_i 和上级事件 y 的故障状态为 $S_y^{(b_y)}$ 在各时间段的发生可能性进行构建。事件发生规则中的规则 l ($l=1, 2, \dots, r$) 可表述如下。

规则 l : 如果下级事件 x_1 失效时间段为 j_1 , x_2 失效时间段为 j_2 , \dots , x_{n-1} 失效时间段为 j_{n-1} , x_n 失效时间段为 j_n , 则上级事件 y 在时间段 1, 2, \dots , m , $m+1$ 的故障状态 $y^{[1]}$, $y^{[2]}$, \dots , $y^{[m]}$, $y^{[m+1]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(l)}(y^{[1]})$, $P_{(l)}(y^{[2]})$, \dots , $P_{(l)}(y^{[m]})$, $P_{(l)}(y^{[m+1]})$ 。同样有

$$P_{(l)}(y^{[1]}) + P_{(l)}(y^{[2]}) + \dots + P_{(l)}(y^{[m]}) + P_{(l)}(y^{[m+1]}) = 1$$

当 $m=2$, $n=2$ 时, 规则总数 $r=(m+1)^n=9$, T-S 动态门的事件发生规则如表 6 所示。

表 6 T-S 动态门的事件发生规则

规则	x_1	x_2	$y = S_y^{(b_y)}$		
			1	2	3
1	1	1	$P_{(1)}(y^{[1]})$	$P_{(1)}(y^{[2]})$	$P_{(1)}(y^{[3]})$
2	1	2	$P_{(2)}(y^{[1]})$	$P_{(2)}(y^{[2]})$	$P_{(2)}(y^{[3]})$
3	1	3	$P_{(3)}(y^{[1]})$	$P_{(3)}(y^{[2]})$	$P_{(3)}(y^{[3]})$
4	2	1	$P_{(4)}(y^{[1]})$	$P_{(4)}(y^{[2]})$	$P_{(4)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
l	j_1	j_2	$P_{(l)}(y^{[1]})$	$P_{(l)}(y^{[2]})$	$P_{(l)}(y^{[3]})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
9	3	3	$P_{(9)}(y^{[1]})$	$P_{(9)}(y^{[2]})$	$P_{(9)}(y^{[3]})$

规则 1 表示下级事件 x_1 、 x_2 失效发生时间段均为 1 时, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}$ 、 $y^{[2]}$ 、 $y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(1)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(1)}(y^{[3]})$; 规则 2 表示下级事件 x_1 、 x_2

失效发生时间段分别为 1、2 时, 则上级事件 y 在时间段 1、2、3 的故障状态 $y^{[1]}$ 、 $y^{[2]}$ 、 $y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性分别为 $P_{(2)}(y^{[1]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[2]})$ 、 $P_{(2)}(y^{[3]})$ 。

事件发生规则只能描述下级事件 x_i 的失效的时间段 j_i , 不能描述下级事件 x_i 在时间段 j_i 的故障状态 $x_i^{[j_i]}$, 因而事件发生规则不适用于多态系统, 只适用于二态系统。

综上分析可知, 时间状态规则相比于事件发生规则, 可以对二态和多态系统中的逻辑关系进行描述, 具有更强的逻辑关系描述能力; 而随着任务时间划分段数 m 的增加, 输入规则的列数增多, 涉及的计算也将增多。

1.3 T-S 动态故障树算法

在构建 T-S 动态门及其描述规则的基础上, 提出基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法。

1.3.1 输入规则算法

通过输入规则算法可求得输入规则执行可能性。事件不确定性描述下的基础数据与故障率有关, 下级事件 x_i 的故障率用 λ_i 表示, 则时间状态规则、事件发生规则下的输入规则 l 的执行可能性 $P_{(l)}^*$ 分别由式(1)、(2)定义

$$P_{(l)}^* = \prod_{j_i=1}^{m+1} \prod_{i=1}^n P_{(l)}(x_i^{[j_i]}) \quad (1)$$

$$P_{(l)}^* = \prod_{i=1}^n P_{(l)}(x_i^{[j_i]}) \quad (2)$$

式中, $P_{(l)}(x_i^{[j_i]})$ 为输入规则 l 中 $x_i^{[j_i]}$ 的发生概率, 即下级事件 x_i 在时间段 j_i 的故障概率, $P_{(l)}(x_i^{[j_i]})$ 可由式(3)得到

$$P_{(l)}(x_i^{[j_i]}) = \int_{(j_i-1)\Delta}^{j_i\Delta} f_i(t) dt \quad (3)$$

式中, $f_i(t)$ 为下级事件 x_i 的失效概率密度函数, 当寿命分布为指数分布时, $f_i(t) = \lambda_i \exp(-\lambda_i t)$ 。

1.3.2 输出规则算法

基于输入规则算法所求得的输入规则执行可能性, 并结合输出规则算法, 可计算得到上级事件故障状态概率。上级事件 y 在时间段 j_y 的故障状态 $y^{[j_y]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的概率为

$$\begin{cases} P(y^{[j_y]} = S_y^{(1)}) = \sum_{l=1}^r P_{(l)}^* P_{(l)}(y^{[j_y]} = S_y^{(1)}) \\ P(y^{[j_y]} = S_y^{(2)}) = \sum_{l=1}^r P_{(l)}^* P_{(l)}(y^{[j_y]} = S_y^{(2)}) \\ \vdots \\ P(y^{[j_y]} = S_y^{(k_y)}) = \sum_{l=1}^r P_{(l)}^* P_{(l)}(y^{[j_y]} = S_y^{(k_y)}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P(y^{[j_y]} = S_y^{(b_y)})$ ($b_y = 1, 2, \dots, k_y$) 为上级事件 y 在时间段 j_y 的故障状态 $y^{[j_y]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的概率; $P_{(l)}(y^{[j_y]} = S_y^{(b_y)})$ 为输出规则 l 中上级事件 y 在时间段 j_y 的故障状态 $y^{[j_y]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的发生可能性。

2 T-S 动态故障树的验证与应用

为验证 T-S 动态故障树分析方法的可行性, 将其与 DUGAN 动态故障树分析方法进行对比。目前, 贝叶斯网络、Markov 链和顺序二元决策图是 DUGAN 动态故障树定量分析、求解 DUGAN 动态故障树的代表性方法, 下面分别与这三种求解方法进行对比分析。

2.1 与基于离散时间贝叶斯网络求解的 DUGAN 动态故障树分析方法对比

贝叶斯网络是求解故障树的代表性方法之一。DUGAN 动态故障树创立者 DUGAN 等在文献[23]中提出了用离散时间贝叶斯网络分析求解 DUGAN 动态故障树的方法, 并应用于心脏辅助系统, 得出系统在任务时间内的失效概率。之后, KHAKZAD 等[30]用离散时间贝叶斯网络求解热交换器的 DUGAN 动态故障树; FAKHRAVAR 等用离散时间贝叶斯网络求解油气管路系统的 DUGAN 动态故障树[31]。这里, 用 T-S 动态故障树方法与 DUGAN 等提出的基于离散时间贝叶斯网络求解的 DUGAN 动态故障树分析方法[23]进行对比。

2.1.1 基于离散时间贝叶斯网络求解的 DUGAN 动态故障树分析方法

离散时间贝叶斯网络在贝叶斯网络的基础上将任务时间划分为若干个子任务时间段, 可用来求解 DUGAN 动态故障树。文献[23]针对心脏辅助系统, 建立 DUGAN 动态故障树并用离散时间贝叶斯求解系统在任务时间内的失效概率。心脏辅助系统的 DUGAN 动态故障树如图 5 所示。

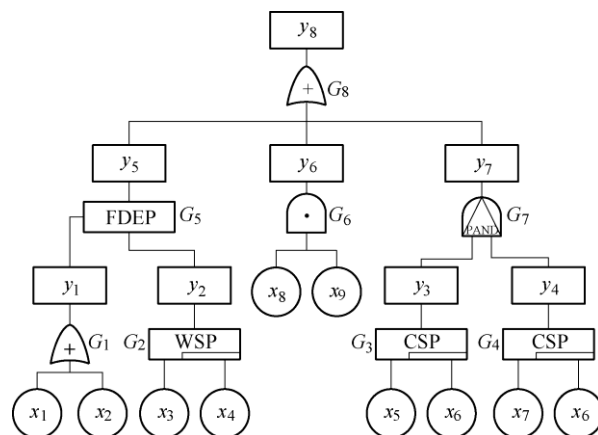


图 5 心脏辅助系统 DUGAN 动态故障树

图 5 中, $G_1 \sim G_8$ 门表示的逻辑门分别为: 或门、温备件门、冷备件门、冷备件门、功能相关门、与门、优先与门、或门, 基本事件 $x_i (i=1, 2, \dots, 9)$ 代表的事件名称及其故障率 λ_i , 如表 7 所示。基本事件 x_i 的可靠度函数为 $R_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, 基本事件 x_i 不可靠度函数为: $F_i(t) = 1 - R_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i t)$ 。 $y_1 \sim y_7$ 为中间事件, 分别表示: 交叉开关模块、CPU 单元、血泵模块的子系统 1、血泵模块的子系统 2、系统控制、马达模块、血泵模块, y_8 为顶事件, 表示心脏辅助系统。

表 7 基本事件对应事件名称及其故障率

基本事件 x_i	事件名称	故障率 $\lambda_i / (\times 10^{-6}/h)$
x_1	交叉开关	1
x_2	监控系统	2
x_3	CPU	4
x_4	备用 CPU	4
x_5	血泵 1	5
x_6	备用血泵	5
x_7	血泵 2	5
x_8	马达 1	5
x_9	马达 2	1

将图 5 的 DUGAN 动态故障树转化为如图 6 所示的贝叶斯网络, DUGAN 动态故障树中的基本事件、中间事件和顶事件分别对应贝叶斯网络的根节点、中间节点和叶节点。

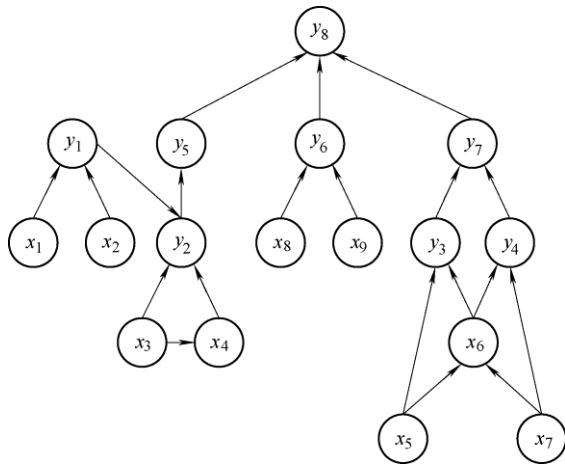


图 6 心脏辅助系统贝叶斯网络

任务时间为 T_M , 任务时间划分段数为 m , 时间间隔为 $\Delta = T_M/m$ 。

根节点 x_i 不为冷备件(x_6)和温备件(x_4)时, 在时间段 j_i 即区间 $[(j_i - 1)\Delta, j_i\Delta)$ 的失效概率为

$$P(x_i^{[j_i]} = 1) = \int_{(j_i-1)\Delta}^{j_i\Delta} f_i(t) dt = \int_{(j_i-1)\Delta}^{j_i\Delta} \frac{F_i(t)}{dt} dt = [\exp(\lambda_i \Delta) - 1] \exp(-\lambda_i j_i \Delta) \quad (5)$$

根节点 x_5 为主件, x_6 为冷备件。假设 x_5 和 x_6 失效时间段分别为 j_5 和 j_6 , 则冷备件 x_6 的失效概率为

$$P(x_6^{[j_6]} = 1) = \frac{\int_{(j_5-1)\Delta}^{j_5\Delta} \int_{(j_6-1)\Delta}^{j_6\Delta} \lambda_5 \lambda_6 \exp[\lambda_6(t_1 - t_2) - \lambda_5 t_1] dt_1 dt_2}{\int_{(j_5-1)\Delta}^{j_5\Delta} \lambda_5 \exp(-\lambda_5 t_1) dt_1} \quad (6)$$

根节点 x_3 为主件, x_4 为温备件, x_4 在储备期间的故障率为工作状态时的 α 倍, α 取值为 0.5。若 x_3 在时间段 j_3 失效, x_4 在时间段 j_4 失效, 且 x_4 先于 x_3 失效或两节点同时失效, 即 $j_4 \leq j_3$, 则温备件 x_4 的失效概率为

$$P(x_4^{[j_4]} = 1) = \int_{(j_4-1)\Delta}^{j_4\Delta} \alpha \lambda_4 \exp(-\alpha \lambda_4 t) dt \quad (7)$$

若 x_3 先于 x_4 失效, 即 $j_3 < j_4$, 则温备件 x_4 的失效概率为

$$P(x_4^{[j_4]} = 1) = \int_{(j_4-1)\Delta}^{j_4\Delta} R_4(j_3) \lambda_4 \exp[-\lambda_4(t - j_3\Delta)] dt \quad (8)$$

式中, $R_4(j_3)$ 为节点 x_4 在时间段 j_3 前为正常状态的概率, $j_3\Delta$ 为时间段 j_3 的时间下限。

通过上述失效概率计算公式求得各根节点在各时间段的失效概率, 通过根节点之间的逻辑关系利用贝叶斯网络推理求解中间节点各时间段的失效概率, 再通过中间节点之间的逻辑关系利用贝叶斯网络推理求解叶节点在任务时间内的失效概率。当任务时间 $T_M = 100\,000\text{ h}$ 、任务时间划分段数 $m = 1、5$ 时, 求得心脏辅助系统的失效概率为 0.329 535 和 0.363 672。

2.1.2 T-S 动态故障树分析

这里, 用 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解, 将图 5 的 DUGAN 动态故障树转化为 T-S 动态故障树, 如图 7 所示, 其中 $G_1 \sim G_8$ 门为 T-S 动态门, 表示的逻辑关系分别为: 或门、温备件门、冷备件门、冷备件门、功能相关门、与门、优先与门、或门。

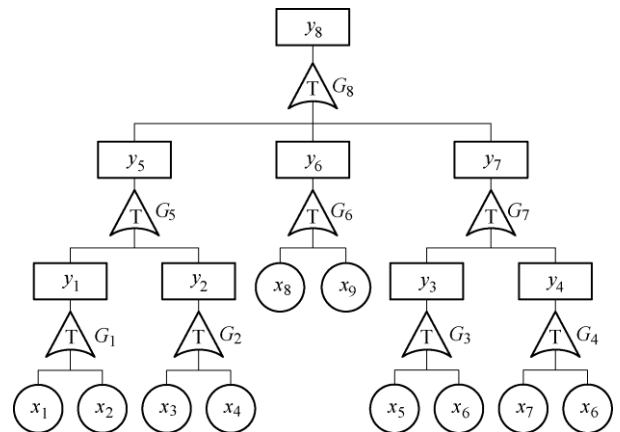


图 7 心脏辅助系统 T-S 动态故障树

备件门、冷备件门、功能相关门、与门、优先与门、或门。

任务时间 $T_M = 100\ 000\ \text{h}$ ，并把任务时间 T_M 分别划分段数 $m=1、5$ 时，按照事件发生规则构建方法构建 $G_1 \sim G_8$ 门的 T-S 动态门规则。 G_1 门表示的逻辑关系为或门。在规则 l 中，假设下级事件 $x_1、x_2$ 的失效时间段分别为 $j_1、j_2$ ，令 $z = \min(j_1, j_2)$ ，则上级事件 y_1 在时间段 j_{y_1} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_1^{[j_{y_1}]} = 1) = \begin{cases} 1 & j_{y_1} = z \\ 0 & j_{y_1} \neq z \end{cases} \quad (9)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时，即整个 $[0, +\infty)$ 时间轴被划分为 2、6 段， G_1 门的事件发生规则分别如表 8、9 所示。

表 8 G_1 门的事件发生规则($m=1$)

规则	x_1	x_2	$y_1 = 1$	
			1	2
1	1	1	1	0
2	1	2	1	0
3	2	1	1	0
4	2	2	0	1

表 9 G_1 门的事件发生规则($m=5$)

规则	x_1	x_2	$y_1 = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	1	0	0	0	0	0
3	1	3	1	0	0	0	0	0
4	1	4	1	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	1	0
36	6	6	0	0	0	0	0	1

G_2 门表示的逻辑关系为温备件门，在规则 l 中，假设下级事件 $x_3、x_4$ 的失效时间段分别为 $j_3、j_4$ ，令 $z = \max(j_3, j_4)$ ，则上级事件 y_2 在时间段 j_{y_2} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_2^{[j_{y_2}]} = 1) = \begin{cases} 1 & j_{y_2} = z \\ 0 & j_{y_2} \neq z \end{cases} \quad (10)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时， G_2 门的事件发生规则分别如表 10、11 所示。

表 10 G_2 门的事件发生规则($m=1$)

规则	x_3	x_4	$y_2 = 1$	
			1	2
1	1	1	1	0
2	1	2	0	1
3	2	1	0	1
4	2	2	0	1

表 11 G_2 门的事件发生规则($m=5$)

规则	x_3	x_4	$y_2 = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	0	1	0	0	0	0
3	1	3	0	0	1	0	0	0
4	1	4	0	0	0	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	0	1
36	6	6	0	0	0	0	0	1

$G_3、G_4$ 门表示的逻辑关系为冷备件门，且下级事件个数和上级事件个数相同，T-S 动态门规则相同。在规则 l 中，当下级事件 $x_5、x_6$ 的失效时间段分别为 $j_5、j_6$ 且在任务时间内一定满足 $j_5 < j_6$ ，则上级事件 y_3 在时间段 j_{y_3} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_3^{[j_{y_3}]} = 1) = \begin{cases} 1 & j_{y_3} = j_6 \\ 0 & j_{y_3} \neq j_6 \end{cases} \quad (11)$$

在规则 l 中，当下级事件 $x_7、x_6$ 的失效时间段分别为 $j_7、j_6$ ，则上级事件 y_4 在时间段 j_{y_4} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_4^{[j_{y_4}]} = 1) = \begin{cases} 1 & j_{y_4} = j_6 \\ 0 & j_{y_4} \neq j_6 \end{cases} \quad (12)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时， $G_3、G_4$ 门的事件发生规则分别如表 12、13 所示。

表 12 $G_3(G_4)$ 门的事件发生规则($m=1$)

规则	$x_5(x_7)$	x_6	$y_3(y_4) = 1$	
			1	2
1	1	2	0	1
2	2	2	0	1

表 13 $G_3(G_4)$ 门的事件发生规则($m=5$)

规则	$x_5(x_7)$	x_6	$y_3(y_4) = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	2	0	1	0	0	0	0
2	1	3	0	0	1	0	0	0
3	1	4	0	0	0	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
15	5	6	0	0	0	0	0	1
16	6	6	0	0	0	0	0	1

G_5 门表示的逻辑关系为功能相关门， y_1 为触发事件， y_2 为下级事件， y_5 为上级事件。 G_5 门的含义为： y_1 发生时， y_2 随即无法使用，上级事件 y_5 发生；或者， y_2 发生时，上级事件 y_5 发生。在规则 l 中，假设下级事件 $y_1、y_2$ 的失效时间段分别为 $j_{y_1}、j_{y_2}$ ，令 $z = \min(j_{y_1}, j_{y_2})$ ，则上级事件 y_5 在时间段 j_{y_5} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_5^{[j_{y_5}]}=1)=\begin{cases} 1 & j_{y_5}=z \\ 0 & j_{y_5}\neq z \end{cases} \quad (13)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时, G_5 门的事件发生规则分别如表 14、15 所示。

表 14 G_5 门的事件发生规则($m=1$)

规则	y_1	y_2	$y_5=1$	
			1	2
1	1	1	1	0
2	1	2	1	0
3	2	1	1	0
4	2	2	0	1

表 15 G_5 门的事件发生规则($m=5$)

规则	y_1	y_2	$y_5=1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	1	0	0	0	0	0
3	1	3	1	0	0	0	0	0
4	1	4	1	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	1	0
36	6	6	0	0	0	0	0	1

G_6 门表示的逻辑关系为与门, 在规则 l 中, 假设下级事件 $x_8、x_9$ 的失效时间段分别为 $j_8、j_9$, 令 $z=\max(j_8, j_9)$, 则上级事件 y_6 在时间段 j_{y_6} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_6^{[j_{y_6}]}=1)=\begin{cases} 1 & j_{y_6}=z \\ 0 & j_{y_6}\neq z \end{cases} \quad (14)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时, G_6 门的事件发生规则分别如表 16、17 所示。

表 16 G_6 门的事件发生规则($m=1$)

规则	x_8	x_9	$y_6=1$	
			1	2
1	1	1	1	0
2	1	2	0	1
3	2	1	0	1
4	2	2	0	1

表 17 G_6 门的事件发生规则($m=5$)

规则	x_8	x_9	$y_6=1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	0	1	0	0	0	0
3	1	3	0	0	1	0	0	0
4	1	4	0	0	0	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	0	1
36	6	6	0	0	0	0	0	1

G_7 门表示的逻辑关系为优先与门, y_3 和 y_4 为下级事件, y_7 为上级事件。 G_7 门的含义为: 当 y_3 不迟

于 y_4 发生时, 上级事件 y_7 才发生, 否则在任务时间段外发生。在规则 l 中, 假设下级事件 $y_3、y_4$ 的失效时间段分别为 $j_{y_3}、j_{y_4}$, 则上级事件 y_7 在时间段 j_{y_7} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_7^{[j_{y_7}]}=1)=1 \quad (15)$$

式中, j_{y_7} 可由下式获得

$$j_{y_7}=\begin{cases} j_{y_4} & j_{y_3}\leq j_{y_4} \\ m+1 & j_{y_3}>j_{y_4} \end{cases} \quad (16)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时, G_7 门的事件发生规则分别如表 18、19 所示。

表 18 G_7 门的事件发生规则($m=1$)

规则	y_3	y_4	$y_7=1$	
			1	2
1	1	1	1	0
2	1	2	0	1
3	2	1	0	1
4	2	2	0	1

表 19 G_7 门的事件发生规则($m=5$)

规则	y_3	y_4	$y_7=1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	0	1	0	0	0	0
3	1	3	0	0	1	0	0	0
4	1	4	0	0	0	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	0	1
36	6	6	0	0	0	0	0	1

G_8 门表示的逻辑关系为或门, 在规则 l 中, 假设下级事件 $y_5、y_6$ 和 y_7 的失效时间段分别为 $j_{y_5}、j_{y_6}$ 和 j_{y_7} 。令 $z=\min(j_{y_5}, j_{y_6}, j_{y_7})$, 则上级事件 y_8 在时间段 j_{y_8} 的故障发生可能性为

$$P_{(l)}(y_8^{[j_{y_8}]}=1)=\begin{cases} 1 & j_{y_8}=z \\ 0 & j_{y_8}\neq z \end{cases} \quad (17)$$

任务时间划分段数 $m=1、5$ 时, G_8 门的事件发生规则分别如表 20、21 所示。

表 20 G_8 门的事件发生规则($m=1$)

规则	y_5	y_6	y_7	$y_8=1$	
				1	2
1	1	1	1	1	0
2	1	1	2	1	0
3	1	2	1	1	0
4	1	2	2	1	0
5	2	1	1	1	0
6	2	1	2	1	0
7	2	2	1	1	0
8	2	2	2	0	1

表 21 G_8 门的事件发生规则($m=5$)

规则	y_5	y_6	y_7	$y_8=1$					
				1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	1	2	1	0	0	0	0	0
3	1	1	3	1	0	0	0	0	0
4	1	1	4	1	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
215	6	6	5	0	0	0	0	1	0
216	6	6	6	0	0	0	0	0	1

表 8~21 为任务时间划分段数 $m=1、5$ 时 $G_1 \sim$

表 23 G_1 门的时间状态规则($m=5$)

规则	x_1						x_2						$y_1=1$					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

用两种规则构建方法分别得到事件发生规则和时间状态规则后,运用所提出的基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法,由式(1)和式(2)计算时间状态规则和事件发生规则下的输入规则执行可能性,由式(4)计算上级事件的失效概率。任务时间划分段数 $m=1、5$ 时,两种规则算法下求解得到心脏辅助系统的失效概率结果相同,说明两种规则是等效的。利用离散时间贝叶斯网络求解的 DUGAN 动态故障树分析方法^[23]、T-S 动态故障树分析方法所求得的心脏辅助系统的失效概率,如表 24 所示。

表 24 心脏辅助系统的失效概率

任务时间 划分段数 m	离散时间 贝叶斯网络 ^[23]	T-S 动态故障树	相对 误差(%)
1	0.329 535	0.329 535	0
5	0.363 672	0.363 672	0

由表 24 可以看出, T-S 动态故障树分析方法求解的结果与离散时间贝叶斯网络求解 DUGAN 动态故障树所得的结果相同,验证了所提出的 T-S 动态故障树分析方法的可行性;而且,与 DUGAN 动态故障树分析方法相比,所提出的 T-S 动态故障树分析方法在分析求解过程中无需借助贝叶斯网络,而是可以直接定量分析。

G_8 门的事件发生规则,若按照时间状态规则构建方法构建 T-S 动态门规则,任务时间划分段数 $m=1、5$ 时, G_1 门的时间状态规则分别如表 22、23 所示。 $G_2 \sim G_8$ 门的时间状态规则构建与此类似。

表 22 G_1 门的时间状态规则($m=1$)

规则	x_1		x_2		$y_1=1$	
	1	2	1	2	1	2
1	0	1	0	1	0	1
2	0	1	1	1	1	0
3	1	1	0	1	1	0
4	1	1	1	1	1	0

2.2 与基于 Markov 链求解的 DUGAN 动态故障树分析方法对比

Markov 链也是求解故障树的代表性方法之一。文献[32]利用模块化分析思想,把 DUGAN 动态故障树分为静态子树和动态子树,用 Markov 链求解 DUGAN 动态故障树的动态子树,并把该方法用于定量评估变电站通信系统动态可靠性;文献[33]用 Markov 链求解计算机联锁系统的 DUGAN 动态故障树得到系统的安全失效概率和危险失效概率。这里,用 T-S 动态故障树分析方法与 Markov 链求解的 DUGAN 动态故障树分析方法进行对比。

2.2.1 基于 Markov 链求解的 DUGAN 动态故障树分析方法

图 8 为某液压系统的 DUGAN 动态故障树, $x_1 \sim x_5$ 为基本事件,其故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_5$ 分别为 $2 \times 10^{-6}/h$ 、 $2 \times 10^{-6}/h$ 、 $3 \times 10^{-6}/h$ 、 $3 \times 10^{-6}/h$ 、 $1 \times 10^{-6}/h$, $y_1、y_2$ 为中间事件, y_3 为顶事件。

该系统的失效机理是: y_2 或 x_4 或 x_5 失效时,系统失效,而 y_2 的失效由 x_1 先失效 y_1 后失效导致, y_1 的失效由 x_2 或 x_3 失效导致,可得 4 条失效路径

$$\begin{cases} x_1 \rightarrow x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \\ x_2 + x_3 \rightarrow x_1 \rightarrow x_4 + x_5 \\ x_2 + x_3 \rightarrow x_4 + x_5 \\ x_4 + x_5 \end{cases}$$

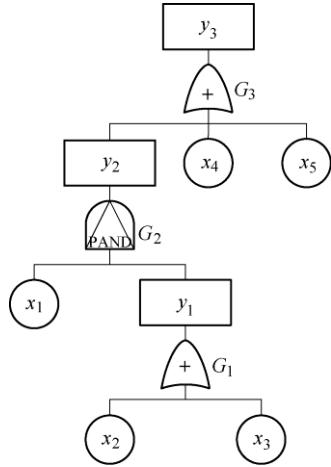


图 8 液压系统 DUGAN 动态故障树

根据上述失效路径,建立如图 9 所示的 Markov 状态转移图。状态 1、2、3、4 为系统的 4 种正常状态,分别表示基本事件 $x_1 \sim x_5$ 正常、 x_1 失效且 $x_2 \sim x_5$ 正常、 x_2 或 x_3 失效且 x_1 和 $x_4 \sim x_5$ 正常、 $x_1 \sim x_3$ 失效且 $x_4 \sim x_5$ 正常; Fa 表示系统失效状态。以状态 1 转移到状态 3 为例,当系统处于状态 1 时,事件 x_2 或事件 x_3 失效会使系统转移为状态 3,其他状态转移规则与此类似。

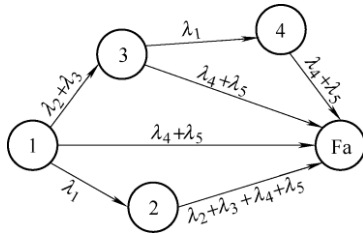


图 9 液压系统 Markov 状态转移图

对 Markov 状态转移图定性分析,得到 Markov 链为

$$\begin{cases} 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow \text{Fa} \\ 1 \rightarrow 3 \rightarrow \text{Fa} \\ 1 \rightarrow \text{Fa} \\ 1 \rightarrow 2 \rightarrow \text{Fa} \end{cases}$$

对 Markov 状态转移图定量分析,用 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 、 $P_3(t)$ 、 $P_4(t)$ 、 $P_5(t)$ 分别表示系统在时刻 t 处于状态 1~4 和 Fa 的概率,则由图 9 可得到状态转移速率矩阵 T

$$T = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^5 \lambda_i & \lambda_1 & \lambda_2 + \lambda_3 & 0 & \lambda_4 + \lambda_5 \\ 0 & -\sum_{i=2}^5 \lambda_i & 0 & 0 & \sum_{i=2}^5 \lambda_i \\ 0 & 0 & -\lambda_1 - \lambda_4 - \lambda_5 & \lambda_1 & \lambda_4 + \lambda_5 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_4 - \lambda_5 & \lambda_4 + \lambda_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

状态转移速率矩阵 T 中的第一行第一列元素表示状态 1 转出的转移速率,第一行第二列元素表示状态 1 向状态 2 的转移速率,其他元素的定义与此类似。列出 Markov 链对应的微分方程

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

式中

$$\frac{dP(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{dP_1(t)}{dt} & \frac{dP_2(t)}{dt} & \frac{dP_3(t)}{dt} & \frac{dP_4(t)}{dt} & \frac{dP_5(t)}{dt} \end{bmatrix}^T$$

$$P(t) = [P_1(t) \ P_2(t) \ P_3(t) \ P_4(t) \ P_5(t)]^T$$

以 $P(0)=[1, 0, 0, 0, 0]^T$ 为初始值,通过求解上式微分方程组,得到 $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$ 、 $P_3(t)$ 、 $P_4(t)$ 、 $P_5(t)$ 的解析解

$$P_1(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right)$$

$$P_2(t) = \exp\left(-\sum_{i=2}^5 \lambda_i t\right) - \exp\left(-\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right)$$

$$P_3(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5)t] - \exp\left(-\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right)$$

$$P_4(t) = \exp[-(\lambda_4 + \lambda_5)t] - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5)t] -$$

$$\frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \exp[-(\lambda_4 + \lambda_5)t] + \frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \exp\left(-\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right)$$

$$P_5(t) = \frac{\lambda_2}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \exp\left(-\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right) - \exp\left(-\sum_{i=2}^5 \lambda_i t\right) -$$

$$\frac{\lambda_2 + \lambda_3}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \exp[-(\lambda_4 + \lambda_5)t] + \frac{\lambda_3}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \exp\left(-\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right) + 1$$

将故障率 $\lambda_1 \sim \lambda_5$ 数值和任务时间 $T_M = 10\ 000\ \text{h}$ 代入 $P_5(t)$,求得顶事件 y_3 的失效概率 $P_5(T_M) = 0.039\ 672$ 。

2.2.2 T-S 动态故障树分析

这里,用 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解,将图 8 的 DUGAN 动态故障树转化为如图 10 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或门、优先与门、或门。 $x_1 \sim x_5$ 为基本事件, y_3 为顶事件,表示系统失效。基本事件 $x_1 \sim x_5$ 在各时间段的失效概率可由式(5)得到。

假设任务时间划分段数 $m = 5$ 时, $G_1 \sim G_3$ 门对应的事件发生规则分别见表 25~27,任务时间划分段数 $m = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ 时,规则构建与此类似。

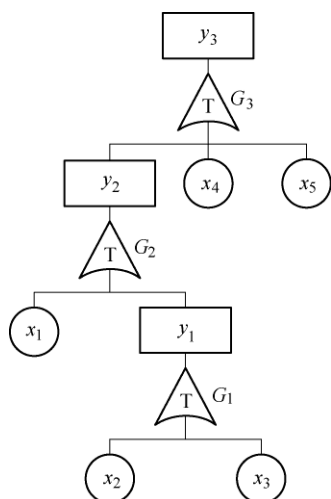


图 10 T-S 动态故障树

表 25 G_1 门的事件发生规则

规则	x_2	x_3	$y_1 = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	1	0	0	0	0	0
3	1	3	1	0	0	0	0	0
4	1	4	1	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	1	0
36	6	6	0	0	0	0	0	1

表 26 G_2 门的事件发生规则

规则	x_1	y_1	$y_2 = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	0	1	0	0	0	0
3	1	3	0	0	1	0	0	0
4	1	4	0	0	0	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	0	1
36	6	6	0	0	0	0	0	1

表 27 G_3 门的事件发生规则

规则	x_4	y_2	x_5	$y_3 = 1$					
				1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	1	2	1	0	0	0	0	0
3	1	1	3	1	0	0	0	0	0
4	1	1	4	1	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
215	6	6	5	0	0	0	0	1	0
216	6	6	6	0	0	0	0	0	1

根据 Markov 链求解的 DUGAN 动态故障树分析方法^[18]、T-S 动态故障树分析方法($m = 5, 10, 15, 20, 25, 30$)求得液压系统失效概率, 如表 28 所示。

表 28 液压系统的失效概率

Markov 链	本文方法		相对误差(%)
	任务时间划分段数 m	T-S 动态故障树	
0.039 672	5	0.039 579	0.233 7
	10	0.039 626	0.116 9
	15	0.039 641	0.077 9
	20	0.039 649	0.058 5
	25	0.039 654	0.046 8
	30	0.039 657	0.039 0

由表 28 可以看出, 由于基于 Markov 链求解的 DUGAN 动态故障树分析方法在时间上是连续的, 而 T-S 动态故障树分析方法是将时间离散化, 所以会产生离散误差, 但随着任务时间划分段数 m 的增加, 离散误差越来越小, T-S 动态故障树分析方法的结果越来越逼近于 Markov 链求解 DUGAN 动态故障树所得的结果, 验证了所提出的 T-S 动态故障树分析方法的可行性。而且, T-S 动态故障树分析方法在分析求解过程中无需借助 Markov 链, 而是可以直接定量分析。

2.3 与基于顺序二元决策图求解的 DUGAN 动态故障树分析方法对比

顺序二元决策图同样也是求解故障树的代表性方法之一。顺序二元决策图方法首先将 DUGAN 动态故障树中转化为含有顺序事件而不含有动态逻辑门的故障树, 根据转化后的故障树建立顺序二元决策图及含有顺序事件的布尔运算规则, 然后根据顺序二元决策图获取失效路径并对其进行分析, 得到多单元顺序的发生概率^[34-35]。这里, 为进一步论证所提方法的可行性, 用 T-S 动态故障树分析方法与顺序二元决策图求解的 DUGAN 动态故障树分析方法进行对比。

2.3.1 基于顺序二元决策图求解的 DUGAN 动态故障树分析方法

文献[25]针对硬盘系统的 DUGAN 动态故障树, 提出用顺序二元决策图求解该系统。硬盘系统的 DUGAN 动态故障树如图 11 所示。该系统的逻辑门由两个温备件门和一个或门组成, 基本事件由主硬盘 x_1 、 x_3 和一个公用的温备件硬盘 x_2 组成。主硬盘 x_1 的故障率 $\lambda_1 = 0.001/\text{h}$, 主硬盘 x_3 的故障率 $\lambda_3 = 0.003/\text{h}$, 温备件硬盘 x_2 在工作期间的故障率 $\lambda_2 = 0.0025/\text{h}$, 在储备期间的故障率为工作状态时的 α 倍, 取 $\alpha = 0.6$, 中间事件 y_1 和 y_2 代表主硬盘 x_1 单元和主硬盘 x_3 单元。当中间事件 y_1 或 y_2 失效时, 系统 y_3 失效。

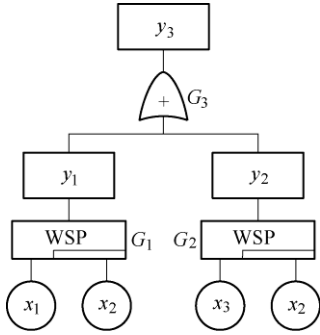


图 11 硬盘系统 DUGAN 动态故障树

将图 11 所示的 DUGAN 动态故障树转化为包含顺序事件且没有动态逻辑门的故障树, 如图 12 所示。

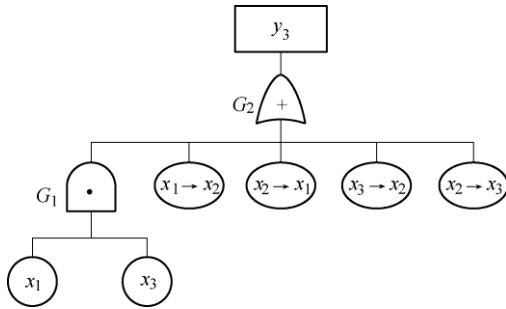


图 12 硬盘系统转化后的故障树

根据图 12 中的故障树, 基本事件按照 x_1 、 x_3 、 $(x_1 \rightarrow x_2)$ 、 $(x_2 \rightarrow x_1)$ 、 $(x_3 \rightarrow x_2)$ 、 $(x_2 \rightarrow x_3)$ 的顺序排列, 得到如图 13 所示的顺序二元决策图。

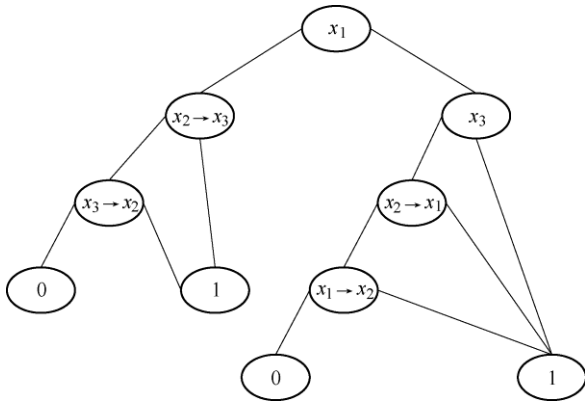


图 13 硬盘系统顺序二元决策图

由图 13 中的顺序二元决策图, 得到系统不变化的失效路径有 5 条, 分别为

$$\begin{cases} x_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_3 \cdot (x_2 \rightarrow x_1) \\ x_1 \cdot x_3 \cdot (x_2 \rightarrow x_1) \cdot (x_1 \rightarrow x_2) \\ \overline{x_1} \cdot (x_2 \rightarrow x_3) \\ \overline{x_1} \cdot (x_2 \rightarrow x_3) \cdot (x_3 \rightarrow x_2) \end{cases}$$

以第 2、3 条不变化的失效路径为例, 第 2 条失效路径表示 x_3 不发生且 x_2 先于 x_1 发生时, 系统失

效; 第 3 条失效路径表示 x_3 不发生且 x_1 先于 x_2 发生时, 系统失效。

根据系统不变化的失效路径可得系统不可靠度 $F(t)$ 为:

$$F(t) = P(x_1 \cdot x_3) + P(\overline{x_3} \cdot (x_2 \rightarrow x_1)) + P(\overline{x_3} \cdot (x_1 \rightarrow x_2)) + P(\overline{x_1} \cdot (x_2 \rightarrow x_3)) + P(\overline{x_1} \cdot (x_3 \rightarrow x_2))$$

根据公式计算不变化顺序事件的发生概率, 得到系统在任务时间 $T_M = 1\,000\text{ h}$ 的失效概率为 0.938 432。

图 11 的 DUGAN 动态故障树, 可转化为如图 14 所示的 Markov 状态转移图。

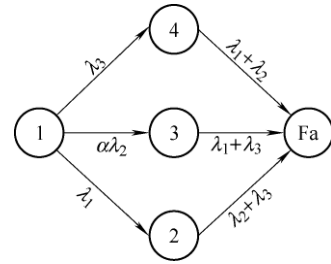


图 14 硬盘系统 Markov 状态转移图

状态 1、2、3、4 为系统的 4 种正常状态, 分别表示 $x_1 \sim x_3$ 正常、 x_1 失效且 x_2 和 x_3 正常、 x_2 失效且 x_1 和 x_3 正常、 x_3 失效且 x_1 和 x_2 正常; Fa 表示系统失效状态。根据图 14 的 Markov 状态转移图, 将 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 、 α 、 T_M 数值代入 Markov 链求解方法中求得系统的失效概率为 0.938 432。可见, 顺序二元决策图与 Markov 链求得的结果相同。

2.3.2 T-S 动态故障树分析

这里, 用 T-S 动态故障树分析方法进行分析求解。将图 11 的 DUGAN 动态故障树转化为如图 15 所示的 T-S 动态故障树。 $G_1 \sim G_3$ 门表示的逻辑关系分别为温备件门、温备件门、或门。

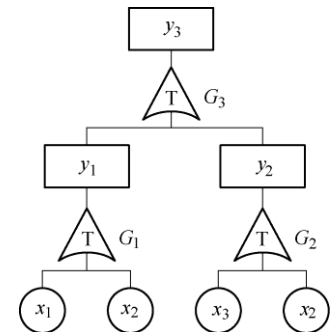


图 15 硬盘系统 T-S 动态故障树

在任务时间划分段数 $m = 5$ 时, G_1 、 G_2 门对应的事件发生规则如表 29 所示, G_3 对应的事件发生规则如表 30 所示。任务时间划分段数 $m = 5$ 、10、15、20、25、30 时, 规则构建与此类似。

表 29 $G_1(G_2)$ 门的事件发生规则

规则	$x_1(x_3)$	x_2	$y_1(y_2) = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	0	1	0	0	0	0
3	1	3	0	0	1	0	0	0
4	1	4	0	0	0	1	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	0	1
36	6	6	0	0	0	0	0	1

表 30 G_3 门的事件发生规则

规则	y_1	y_2	$y_3 = 1$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	1	0	0	0	0	0
3	1	3	1	0	0	0	0	0
4	1	4	1	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
35	6	5	0	0	0	0	1	0
36	6	6	0	0	0	0	0	1

根据 T-S 动态门规则, 运用所提出的基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法, 由式(2)计算 T-S 动态门的输入规则执行可能性, 由式(4)计算上级事件的失效概率。利用顺序二元决策图^[25]求解的 DUGAN 动态故障树分析方法、T-S 动态故障树分析方法($m=5、10、15、20、25、30$)所求得的硬盘系统的失效概率, 如表 31 所示。

表 31 硬盘系统的失效概率

顺序二元 决策图 ^[25]	本文方法		相对误差(%)
	任务时间 划分段数 m	T-S 动态故障树	
0.938 432	5	0.933 515	0.524 0
	10	0.936 126	0.245 7
	15	0.936 927	0.160 3
	20	0.937 315	0.119 0
	25	0.937 544	0.094 6
	30	0.937 695	0.078 5

由表 31 可以看出, 由于基于顺序二元决策图求解的 DUGAN 动态故障树分析方法在时间上是连续的, 而 T-S 动态故障树分析方法是将时间离散化, 所以会产生离散误差, 但随着任务时间划分段数 m 的增加, 离散误差越来越小, T-S 动态故障树分析方法的结果越来越逼近于顺序二元决策图求解 DUGAN 动态故障树所得的结果, 验证了所提出的 T-S 动态故障树分析方法的可行性。而且, T-S 动态故障树分析方法在分析求解过程中无需借助顺序二

元决策图, 而是可以直接定量分析。

3 结论

(1) 针对 DUGAN 动态故障树分析方法无法对系统中的静、动态失效行为完全刻画的问题, 提出了 T-S 动态故障树分析方法。定义并提出了 T-S 动态门及描述 T-S 动态门的时间状态规则和事件发生规则构建方法, 提出了基于 T-S 动态门输入、输出规则算法的 T-S 动态故障树分析求解计算方法。所提方法能够描述系统的任意形式静、动态失效行为, 增强了静、动态失效行为的刻画表达能力。通过用所提出的 T-S 动态故障树分析方法分别与离散时间贝叶斯网络、Markov 链和顺序二元决策图求解的 DUGAN 动态故障树分析方法对比, 验证了所提方法的可行性和计算的简便性。

(2) DUGAN 动态故障树是基于传统故障树进行延伸创立的。T-S 故障树相对于传统故障树可以刻画任意形式的多态、组合等静态失效行为, T-S 故障树更为通用化, 传统故障树是 T-S 故障树的某种特例。对 T-S 故障树进行延伸, 提出并创立了一种原创性的动态故障树分析方法——T-S 动态故障树分析方法, 为诞生于贝尔实验室的故障树分析法提供了一种新的探索 and 方案。T-S 动态故障树分析方法刚刚建立, 接下来要研究考虑故障程度的 T-S 动态故障树分析方法、T-S 动态故障树的重要度分析方法等。

参 考 文 献

- [1] PURBA J H. A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 70: 21-29.
- [2] ROGITH D, IYENGAR M S, SINGH H. Using fault trees to advance understanding of diagnostic errors[J]. Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety, 2017, 43(11): 598-605.
- [3] 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.
- [4] JUNGES S, GUCK D, KATOEN J P, et al. Uncovering dynamic fault trees[C]//IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks. June 28 - July 1, Toulouse, France, 2016: 299-310.
- [5] 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.
- [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: 31-40.
- [7] 姚成玉, 赵静一. 基于 T-S 模型的液压系统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] 姚成玉, 张荧驿, 王旭峰, 等. T-S 模糊故障树重要度分析方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1261-1268. YAO Chengyu, ZHANG Yingyi, WANG Xufeng, et al. Importance analysis method of fuzzy fault tree based on T-S model[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(11): 1261-1268.
- [9] 姚成玉, 张荧驿, 陈东宁, 等. T-S 模糊重要度分析方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 163-169. YAO Chengyu, ZHANG Yingyi, CHEN Dongning, et al. Research T-S fuzzy importance analysis methods[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 163-169.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] KABIR S. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 77: 114-135.
- [13] DUGAN J B, BAVUSO S J, BOYD M A. Fault trees and sequence dependencies[J]. Microelectronics Reliability, 1991, 31(5): 1045.
- [14] DUGAN J B, BAVUSO S J, BOYD M A. Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 363-377.
- [15] 孙利娜, 黄宁, 张朔, 等. 基于动态故障树的 AFDX 网络性能可靠性分析[J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 53-56. SUN Lina, HUANG Ning, ZHANG Shuo, et al. Performance reliability analysis of AFDX network based on dynamic fault tree[J]. Computer Science, 2016, 43(10): 53-56.
- [16] CHIACCHIO F, D'URSO D, COMPAGNO L, et al. SHyFTA, a stochastic hybrid fault tree automaton for the modelling and simulation of dynamic reliability problems[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47: 42-57.
- [17] 王斌, 吴丹丹, 莫毓昌, 等. 基于多值决策图的动态故障树分析方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 70-73. WANG Bin, WU Dandan, MO Yuchang, et al. Dynamic fault tree analysis based on multiple-valued decision diagrams[J]. Computer Science, 2016, 43(10): 70-73.
- [18] YEVKIN O. An efficient approximate Markov chain method in dynamic fault tree analysis[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2016, 32: 1509-1520.
- [19] BOUDALI H, CROUZEN P, STOELINGA M. Dynamic fault tree analysis using input/output interactive Markov chains[C]//IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks. June 25-28, Edinburgh, UK, 2007: 708-717.
- [20] BOUDALI H, CROUZEN P, STOELINGA M. A rigorous compositional and extensible framework for dynamic fault tree analysis[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2010, 7(2): 128-143.
- [21] 李彦锋. 复杂系统动态故障树分析的新方法及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. LI Yanfeng. New methods of dynamic fault tree analysis of complex system and its application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 古莹奎, 邱光琦. DTBN 在复杂系统动态概率安全评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(4): 74-79. GU Yingkui, QIU Guangqi. Application of DTBN to complex system dynamic probabilistic safety assessment[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(4): 74-79.
- [25] TANNOUS O, XING L, DUGAN J B. Reliability analysis

- of warm standby systems using sequential BDD[C]//Reliability and Maintainability Symposium. January 24-27, Lake Buena Vista, USA, 2011: 1-7.
- [26] XING L, TANNOUS O, DUGAN J B. Reliability analysis of nonrepairable cold-standby systems using sequential binary decision diagram[J]. IEEE Transaction on systems, Man, and Cybernetics-Part A: System and Humans, 2012, 43(3): 715-726.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] FUSSELL J B, ABER E F, RAHL R G. On the quantitative analysis of priority-AND failure logic[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1976, 25(5): 324-326.
- [30] KHAKZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Risk-based design of process systems using discrete-time Bayesian networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 109: 5-17.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 苏宏升, 文俊. 区域计算机联锁系统安全性分析的动态故障树模型与方法研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 46-53.
- SU Hongsheng, WEN Jun. Research on modeling of dynamic fault tree in regional computer interlocking system safety analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(3): 46-53.
- [34] 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.
- [35] 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.
-
- 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
- 饶乐庆, 男, 1991 年出生。主要研究方向为系统可靠性。
- 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。
E-mail: dnchen@ysu.edu.cn
- 侯鑫, 男, 1993 年出生。主要研究方向为系统可靠性。
- 吕世君, 男, 1975 年出生, 讲师, 博士研究生。主要研究方向为系统可靠性。
- 于传宇, 男, 1990 年出生。主要研究方向为系统可靠性。