

doi: 10.7690/bgzd.2021.01.012

# 一种新型适用于核电厂 DCS 系统输出模块可靠性分析方法

曾丽芳<sup>1</sup>, 吴志强<sup>2</sup>, 刘朝晖<sup>1</sup>, 刘明星<sup>2</sup>, 田旭峰<sup>2</sup>

(1. 南华大学计算机学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国核动力研究设计院, 成都 610213)

**摘要:** 为提高 DCS 系统的安全性和可靠性, 提出一种基于区间 T-S (takagi-sugeno) 模糊故障树的 DCS 系统输出模块可靠性分析方法。以 T-S 模糊故障树为基础, 构建区间 T-S 模糊故障树模型, 根据底事件的模糊信息计算顶事件失效的故障可能性和模块薄弱环节, 给出输出模块可靠性和组成部件的重要度排序, 并结合核电厂模拟量输出模块进行实例分析。结果表明: 该方法与实际情况相符, 可作为传统可靠性分析方法的主要补充。

**关键词:** I/O 模块; 可靠性分析; T-S 模糊故障树; 区间变量

**中图分类号:** TM623 **文献标志码:** A

## A New Method for Reliability Analysis of DCS System Output Module in Nuclear Power Plants

Zeng Lifang<sup>1</sup>, Wu Zhiqiang<sup>2</sup>, Liu Zhaozhui<sup>1</sup>, Liu Mingxing<sup>2</sup>, Tian Xufeng<sup>2</sup>

(1. Computer School, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** In order to improve the security and reliability of DCS system, a reliability analysis method of output module of DCS system based on interval T-S (Takagi Sugeno) fuzzy fault tree is proposed. Based on the T-S fuzzy fault tree, the interval T-S fuzzy fault tree model is constructed. According to the fuzzy information of the bottom event, the failure probability of the top event and the weak link of the module are calculated. The reliability of the output module and the importance ranking of the components are given, and an example is analyzed with the analog output module of the nuclear power plant. The results show that the method is consistent with the actual situation and can be used as the main supplement of the traditional reliability analysis method.

**Keywords:** I/O module; reliability analysis; T-S fuzzy fault tree; interval variable

## 0 引言

核电厂数字化仪控系统 (digital control system, DCS) 是核电厂的“神经中枢”, 是确保核电站安全、可靠运行的重要装备<sup>[1]</sup>。输出模块是 DCS 系统中广泛分布的组件, 对 DCS 系统的安全性和可靠性起重大影响; 因此, 研究输出模块的可靠性对核电安全具有重要意义。

目前, 模块级的可靠性分析主要集中在功率 IGBT 模块<sup>[2-3]</sup>和电源模块<sup>[4-5]</sup>, 针对输出模块的可靠性分析较少。近年来, 张怡<sup>[6]</sup>和曾珂等<sup>[7]</sup>采用传统故障树模型计算输出模块的失效概率以及表征模块的可靠度, 但是没有将计算中涉及到诸多不确定量及不确定量之间的模糊联系考虑进去。传统故障树分析法 (fault tree analysis, FTA) 是可靠性分析的常见方法, 但存在不足: 1) 需要已知基本部件的精确故障概率; 2) 需要明确事件之间故障机理; 3) 底事件故障状态只限于“正常”“完全故障”两态。

T-S 模糊故障树是一种用 T-S 模糊模型构造 T-S 门代替传统故障树中布尔逻辑“与门”和“或门”, 描述事件间联系, 并采用模糊数描述底事件故障概率及故障程度的改进故障树分析方法<sup>[8]</sup>。T-S 方法解决了传统故障树存在的 3 个不足, 极大地降低了复杂系统建立故障树的难度, 为定量计算复杂系统可靠性提供了新方案, 并在液压系统<sup>[9-12]</sup>、导航系统<sup>[8]</sup>、化工装置系统<sup>[13]</sup>、动车组系统<sup>[14]</sup>等领域可靠性分析中有较多研究, 但是在核电 DCS 领域未见其有可靠性分析相关的应用。

笔者提出一种新型基于区间 T-S 模糊故障树的 DCS 系统输出模块可靠性分析方法, 计算结果可为模块优化和检修方案提供参考依据。

## 1 区间 T-S 模糊故障树基本理论

图 1 为一个简单的 T-S 故障树, 其中,  $a, c$  为 T-S 模糊门,  $b$  为中间事件,  $x_1, x_2, x_3$  为底事件。其中顶事件的故障概率可以由底事件的故障概率由下

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2020-10-26

作者简介: 曾丽芳 (1995—), 女, 湖南人, 硕士, 从事核反应堆仪表与控制系统可靠性评估与分析研究。E-mail: 13187034050@163.com。

而上计算得到，底事件的重要度排序可以通过算法得到其对顶事件的贡献度。

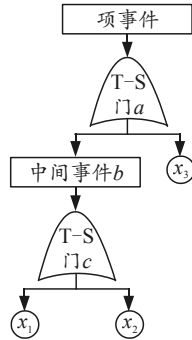


图 1 简单 T-S 模糊故障树

1.1 事件描述和区间变量

区别于传统故障树的“二态假设”，T-S 模糊故障树中事件故障程度常用模糊数来表示，模糊数一般取 0, 0.5, 1 描述“无故障”“半故障”“完全故障”3 种故障程度。选取梯形隶属度函数<sup>[11]</sup>作为事件故障状态的隶属函数，具体见式(1)。式中： $u_M(x)$  的故障程度隶属度， $M$  分别取 0, 0.5, 1； $m_0$  表示模糊支撑集的中心，数值上等于  $M$  的当前取值； $f_l, f_r$  表示左右模糊区； $s_l, s_r$  表示左右支撑半径。

$$u_M(x) = \begin{cases} 0, & (0 \leq x < m_0 - s_l - f_l) \\ (x - (m_0 - s_l - f_l)) / f_l, & (m_0 - s_l - f_l \leq x < m_0 - s_l) \\ 1, & (m_0 - s_l \leq x < m_0 + s_r) \\ ((m_0 + s_r + f_r) - x) / f_r, & (m_0 + s_r \leq x < m_0 + s_r + f_r) \\ 0, & (m_0 + s_r + f_r \leq x) \end{cases} \quad (1)$$

在传统故障树分析中，事件的故障率为精确值：一方面，在很多情况下，精确值难以获取；另一方面，部件故障率与现场工作环境以及制作工艺有很大的关联，以固化值描述故障率存在一定的局限。笔者以模糊子集代替事件的精确故障率对事件进行描述，且模糊子集的隶属函数选取三角形隶属函数。例如节点  $x_1$  在故障程度为  $x_1^{i1}$  时的故障率  $p(x_1^{i1})$  用模糊子集表示为  $\{g_l, g_m, g_u\}$ ， $g_m$  为模糊子集的中心， $g_l, g_u$  表示模糊子集的上下。实际上模糊子集的上下限难以确定，且固定的上下限值容易丢失信息，为此引入区间变量<sup>[15]</sup>。例如节点  $x_1$  在故障程度为  $x_1^{i1}$  时的故障率用区间模糊子集表示为  $\{(g^l, g_l^l), g^m, (g_u^u, g^u)\}$ ，式中  $(g^l, g_l^l)$  代替模糊子集的下限， $(g_u^u, g^u)$  代替模糊子集的上限。区间模糊子集的隶属函数为：

$$u_{p(x_1^{i1})}(g) = \begin{cases} 0, & 0 \leq g < g^l \\ [g^l, g] & g^l \leq g < g_l^l \\ \left[ \begin{matrix} 1 - (g^m - g) / (g^m - g_l^l), \\ 1 - (g^m - g) / (g^m - g^l) \end{matrix} \right], & g_l^l \leq g < g^m \\ \left[ \begin{matrix} 1 - (g - g^m) / (g_l^u - g^m), \\ 1 - (g - g^m) / (g^u - g^m) \end{matrix} \right], & g^m \leq g < g_l^u \\ [g_u^u, g] & g_l^u \leq g < g^u \\ 0 & g^u \leq g \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

其函数图像如图 2 所示。

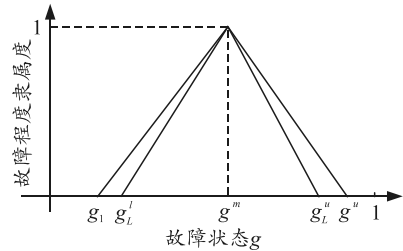


图 2 区间模糊子集隶属度函数

1.2 T-S 模糊门算法

T-S 模型由 IF-THEN 模糊规则组成，是一种万能逼近器，可用于描述事件之间的联系，从而构成 T-S 模糊门<sup>[8]</sup>。在 T-S 模型中如果底事件为  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，上级事件为  $y$  且故障程度分别用模糊数  $\{x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k1}\}, \{x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{k2}\}, \dots, \{x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{kn}\}$  和  $\{y^1, y^2, \dots, y^{ky}\}$  描述。则 T-S 门算法可表述<sup>[8]</sup>为：

规则  $l$ ：如果事件  $x_1$  故障程度为  $x_1^{i1}$ ， $x_2$  故障程度为  $x_2^{i2}, \dots, x_n$  故障状态为  $x_n^{in}$ ，则上级事件  $y$  为故障状态  $y^{ky}$  的可能性为  $p^l(y^{ky})$ 。其中  $i_1=1, \dots, k_1; i_2=1, \dots, k_2; \dots; i_n=1, \dots, k_n$ 。总规则数为  $r=k_1, k_2, \dots, k_n$ 。

假设底事件发生各种故障程度的概率为  $p(x_1^{i1}), p(x_2^{i2}), \dots, p(x_n^{in})$ ，根据上述规则可知规则  $l(l=1, \dots, r)$  的发生概率可以由下式计算得到：

$$p_0^l = p(x_1^{i1}) p(x_2^{i2}) \dots p(x_n^{in}) \quad (3)$$

因此，上级事件各个故障状态下的失效概率为：

$$\left. \begin{aligned} p(y^1) &= \sum_{l=1}^r p_0^l p^l(y^1) \\ p(y^2) &= \sum_{l=1}^r p_0^l p^l(y^2) \\ &\vdots \\ p(y^{ky}) &= \sum_{l=1}^r p_0^l p^l(y^{ky}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

若已知底事件  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  的故障状态为  $\{x_1^1, x_2^2, \dots, x_n^n\}$ ，则由上级事件  $y$  各种故障程度的发生概率为：

$$\left. \begin{aligned} p(y^1) &= \sum_{l=1}^r B_l^*(x') p^l(y^1) \\ p(y^2) &= \sum_{l=1}^r B_l^*(x') p^l(y^2) \\ &\vdots \\ p(y^{k_y}) &= \sum_{l=1}^r B_l^*(x') p^l(y^{k_y}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中

$$B_l^*(x') = \left( \prod_{j=1}^n u_{x_j^{ij}}(x_j') \right) / \left( \sum_{l=1}^r \prod_{j=1}^n u_{x_j^{ij}}(x_j') \right) \quad (6)$$

$u_{x_j^{ij}}(x_j')$  表示底事件  $x_j$  在故障状态为  $x_j'$  时的隶属度。式(4)、式(5)分别从 2 方面计算上级事件的相关故障概率，计算结果不仅可表征顶事件完成规定任务的可靠度，而且是底事件重要度排序的关键数据。

### 1.3 T-S 重要度分析

已知当底事件  $x_j$  的故障程度为  $x_j^{kj}$  时，模糊子集为  $p(x_j^{kj})$ ，顶事件  $T$  故障程度为  $T_q$  的模糊子集为  $p(T=T_q)$ ；

定义 1 部件  $x_j$  故障状态为  $x_j^{kj}$  的模糊子集  $p(x_j^{kj})$  对顶事件  $T$  为  $T_q$  的 T-S 模糊重要度<sup>[17]</sup>为：

$$I_{T_q}^{Fu}(x_j^{k_j}) = E[p(T_q, p(x_j^{k_j})=1) - p(T_q, p(x_j^{k_j})=0)] \quad (7)$$

式中： $p(T_q, p(x_j^{k_j})=1)$  表示底事件  $x_j$  在故障程度为  $x_j^{kj}$  且对应故障程度下模糊子集为 1 时，顶事件  $T$  为  $T_q$  的模糊子集； $p(T_q, p(x_j^{k_j})=0)$  表示底事件  $x_j$  在故障程度为  $x_j^{kj}$  且对应故障程度下模糊子集为 0 时，顶事件  $T$  为  $T_q$  的模糊子集。

定义 2 部件  $x_j$  对系统顶事件  $T$  为  $T_q$  的模糊重要度<sup>[17]</sup>为：

$$I_{T_q}^{Fu}(x_j) = \left( \sum_{i_j=1}^{k_j-1} I_{T_q}^{Fu}(x_j^{k_j}) \right) / (k_j - 1) \quad (8)$$

式中： $k_j-1$  为第  $j$  个底事件的非零故障程度个数；

$I_{T_q}^{Fu}(x_j)$  为底事件  $x_j$  故障程度从 0 到 1 演变过程中各个故障程度对顶事件故障程度的平均影响。

## 2 模拟量输出模块可靠性分析

### 2.1 区间 T-S 模糊故障树

根据核电 DCS 模拟量输出模块结构图，建立如图 3 所示 T-S 模糊故障树。其中： $y_5$  代表模拟量输出模块；中间事件  $y_1 \sim y_4$  分别代表处理器单元、输出单元、通信单元、电源模块；基本事件  $x_1 \sim x_8$  分别为 ARM 控制电路、看门狗电路、输出电路、隔离电路、差分转换电路、FPGA 电路、通道电源及系统电源。

假设故障状态隶属函数参数为  $s_l=s_r=0.1$ 、 $f_l=f_r=0.3$ ，根据专家经验和历史数据得到 T-S 模糊门规则如表 1—表 5 所示。

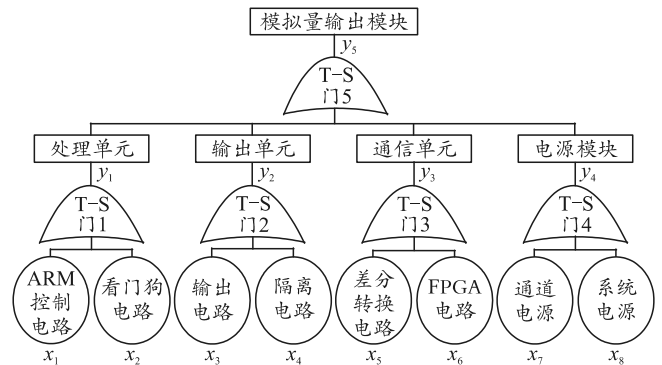


图 3 模拟量输出模块 T-S 模糊故障树

表 1 T-S 模糊门 1 规则

规则	$x_1$	$x_2$	$y_1$		
			0	0.5	1
1	0	0	1.00	0	0
2	0	0.5	0.40	0.40	0.20
3	0	1.0	0	0.55	0.45
4	0.5	0	0.38	0.42	0.20
5	0.5	0.5	0	0.65	0.35
6	0.5	1.0	0	0.15	0.85
7	1.0	0	0	0.55	0.45
8	1.0	0.5	0	0	1.00
9	1.0	1.0	0	0	1.00

表 2 T-S 模糊门 2 规则

规则	$x_3$	$x_4$	$y_2$		
			0	0.5	1
1	0	0	1.0	0	0
2	0	0.5	0.4	0.4	0.2
3	0	1.0	0	0.4	0.6
4	0.5	0	0.6	0.3	0.1
5	0.5	0.5	0.1	0.6	0.3
6	0.5	1.0	0	0.1	0.9
7	1.0	0	0	0.4	0.6
8	1.0	0.5	0	0.1	0.9
9	1.0	1.0	0	0	1

表 3 T-S 模糊门 3 规则

规则	$x_5$	$x_6$	$y_3$		
			0	0.5	1
1	0	0	1.0	0	0
2	0	0.5	0.3	0.5	0.2
3	0	1.0	0	0.1	0.9
4	0.5	0	0.4	0.4	0.2
5	0.5	0.5	0	0.6	0.4
6	0.5	1.0	0	0	1.0
7	1.0	0	0	0.6	0.4
8	1.0	0.5	0	0.2	0.8
9	1.0	1.0	0	0	1.0

表 4 T-S 模糊门 4 规则

规则	$x_7$	$x_8$	$y_4$		
			0	0.5	1
1	0	0	1.0	0	0
2	0	0.5	0.7	0.20	0.10
3	0	1.0	0.5	0.30	0.20
4	0.5	0	0.5	0.30	0.20
5	0.5	0.5	0.3	0.40	0.30
6	0.5	1.0	0	0.40	0.60
7	1.0	0	0	0.40	0.60
8	1.0	0.5	0	0.25	0.75
9	1.0	1.0	0	0	1.00

表 5 T-S 模糊门 5 规则

规则	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>		
					0	0.5	1
1	0	0	1.0	0	0	0	0
2	0	0.5	0.7	0.2	0.1	0	0.5
3	0	1.0	0.5	0.3	0.2	0	1.0
4	0.5	0	0.5	0.3	0.2	0.5	0
5	0.5	0.5	0.3	0.4	0.3	0.5	0.5
6	0.5	1.0	0	0.4	0.6	0.5	1.0
7	1.0	0	0	0.4	0.6	1.0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
81	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0

表中每一行代表一条规则。如表 1：第 1 规则表示底事件 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub> 为无故障状态时，上级事件 y<sub>1</sub> 为无故障状态的可能性为 1，半故障和完全故障的可能性为 0。

2.2 顶事件故障模糊子集

假设底事件故障程度为 0.5 时的区间模糊子集和故障程度为 1 时的区间模糊子集相同，根据 GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》和专家数据，得出模拟量输出模块底事件在故障状态为 1 时的区间模糊子集如表 6 所示。

表 6 底事件区间模糊子集

底事件	区间模糊子集(10 <sup>-6</sup> h)
x <sub>1</sub>	[(0.32, 0.325), 0.33, (0.380, 0.43)]
x <sub>2</sub>	[(0.03, 0.035), 0.04, (0.045, 0.05)]
x <sub>3</sub>	[(0.86, 0.865), 0.87, (0.875, 0.88)]
x <sub>4</sub>	[(0.34, 0.345), 0.35, (0.355, 0.36)]
x <sub>5</sub>	[(0.02, 0.025), 0.03, (0.035, 0.04)]
x <sub>6</sub>	[(0.39, 0.395), 0.40, (0.405, 0.41)]
x <sub>7</sub>	[(0.44, 0.445), 0.45, (0.455, 0.46)]
x <sub>8</sub>	[(0.29, 0.295), 0.30, (0.305, 0.31)]

结合 T-S 规则、表 1—5 和式(4)可以求出 y<sub>1</sub>~y<sub>5</sub> 在各个故障状态下的区间模糊子集，如：

$$p(y_1=0.5) = \sum_{l=1}^9 p_0^l p^l(y_1=0.5) = 0.4 \times p_0^2 + 0.55 \times p_0^3 + 0.42 \times p_0^4 + 0.65 \times p_0^5 + 0.15 \times p_0^6 + 0.55 \times p_0^7 = [(3.39, 3.48), 3.59, (4.11, 4.65)](10^{-7}h). \tag{9}$$

同理可以计算出中间事件 y<sub>1</sub>~y<sub>4</sub>、顶事件 y<sub>5</sub> 各个故障状态下的模糊子集，结果如表 7。

表 7 上级事件区间模糊子集

中间事件	区间模糊子集/(10 <sup>-7</sup> h)
P(y <sub>1</sub> =0.5)	[(3.39, 3.48), 3.59, (4.11, 4.65)]
P(y <sub>1</sub> =1.0)	[(2.27, 2.34), 2.41, (2.76, 3.12)]
P(y <sub>2</sub> =0.5)	[(8.47, 8.81), 8.89, (8.97, 9.4)]
P(y <sub>2</sub> =1.0)	[(8.47, 8.81), 8.89, (8.97, 9.4)]
P(y <sub>3</sub> =0.5)	[(2.54, 2.62), 2.7, (2.78, 2.86)]
P(y <sub>3</sub> =1.0)	[(4.41, 4.51), 4.58, (4.67, 4.75)]
P(y <sub>4</sub> =0.5)	[(4.53, 4.59), 4.65, (4.71, 4.77)]
P(y <sub>4</sub> =1.0)	[(4.39, 4.45), 4.5, (4.56, 4.61)]
P(y <sub>5</sub> =0.5)	[(12.5, 12.6), 12.8, (13.3, 13.7)]
P(y <sub>5</sub> =1.0)	[(15.4, 15.6), 15.8, (16.3, 16.8)]

由上述计算结果可知，上级事件的模糊子集与下级事件的模糊子集正向关联。例如表 6 中：x<sub>3</sub>、x<sub>4</sub> 的区间模糊子集数值偏高，中间事件 y<sub>2</sub> 的模糊子

集数值同样偏高，上级事件的故障概率明显大于下级事件的故障概率，与实际相符；中间事件、顶事件模糊子集区间变量波动范围较底事件模糊子集区间变量波动范围明显增大。为降低上级事件区间模糊子集模糊性，在设置底事件区间变量范围时应尽可能偏小。

2.3 顶事件故障程度可能性

如表 8 所示，假设基本事件 x<sub>1</sub>~x<sub>8</sub> 的当前故障程度分别为 0, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1, 0, 0, 1。通过式(1)计算得到各个底事件的故障程度隶属度。

表 8 底事件故障程度隶属

底事件	u <sub>0</sub> (x)	u <sub>0.5</sub> (x)	u <sub>1</sub> (x)
x <sub>1</sub>	1.000 000 000	0	0
x <sub>2</sub>	1.000 000 000	0	0
x <sub>3</sub>	0.666 666 667	0.333 333 333	0
x <sub>4</sub>	1.000 000 000	0	0
x <sub>5</sub>	1.000 000 000	0	0
x <sub>6</sub>	1.000 000 000	0	0
x <sub>7</sub>	1.000 000 000	0	0
x <sub>8</sub>	0.333 333 333	0.666 666 667	0

结合 T-S 规则表 1—表 5 和式(5)，可以计算出中间事件和顶事件的故障程度发生概率。如：

$$p(y_2=0.5) = \sum_{l=1}^9 B_l^*(x) p^l(y_2=0.5) = 0.4B_2^* + 0.4B_3^* + 0.3B_4^* + 0.6B_5^* + 0.1B_6^* + 0.4B_7^* + 0.2B_8^* = 0.1. \tag{10}$$

同理，可以计算出中间事件和顶事件 y<sub>5</sub> 的故障程度隶属度，具体见表 9。

表 9 上级事件故障程度隶属度

上级事件	故障程度隶属度	上级事件	故障程度隶属度
u <sub>0.5</sub> (y <sub>1</sub> )	0	u <sub>1</sub> (y <sub>3</sub> )	0
u <sub>1</sub> (y <sub>1</sub> )	0	u <sub>0.5</sub> (y <sub>4</sub> )	0.30
u <sub>0.5</sub> (y <sub>2</sub> )	0.10	u <sub>1</sub> (y <sub>4</sub> )	0.20
u <sub>1</sub> (y <sub>2</sub> )	0.03	u <sub>0.5</sub> (y <sub>5</sub> )	0.18
u <sub>0.5</sub> (y <sub>3</sub> )	0	u <sub>0.5</sub> (y <sub>5</sub> )	0.16

由上述结果可知：在上级事件半故障的概率大于完全故障的概率，且出现半故障和完全故障的可能性均很小。实际中，系统电源常采用冗余结构降低系统电源故障对模块的影响，算例中，系统电源处于完全故障状态时，计算出电源模块发生故障的概率较小，与实际情况相符，验证了笔者所提方法的可行性和准确性。

工程上不仅要关注顶事件输出模块的失效率，而且关注哪些因素对输出模块失效起到重要影响。现利用 2.4 节对底事件进行重要度分析，确定导致顶事件失效的关键至险因子，为模块故障诊断、维护决策提供依据，指导风险控制工作。

2.4 T-S 重要度计算

利用式(6)、式(7)和以上 T-S 规则表、区间模

糊子集表，可以计算出各个底事件模糊重要度，结果如表 10 所示。

表 10 底事件的模糊重要度

底事件	$I_{0.5}^{fu}(x_j)$	$I_1^{fu}(x_j)$	底事件	$I_{0.5}^{fu}(x_j)$	$I_1^{fu}(x_j)$
$x_1$	0.24	0.27	$x_5$	0.34	0.41
$x_2$	0.24	0.27	$x_6$	0.26	0.56
$x_3$	0.21	0.26	$x_7$	0.29	0.22
$x_4$	0.24	0.30	$x_8$	0.13	0.09

由表可以得知：在模拟量输出模块处于半故障时，其底事件 T-S 模糊重要度由大到小排序为  $x_5 > x_7 > x_6 > x_1 = x_2 = x_4 > x_3 > x_8$ ，可见  $x_5$  为模块的薄弱环节，故障排查和模块优化从  $x_5$  差分转换电路开始；当系统处于完全故障时，其底事件 T-S 模糊重要度由大到小排序为  $x_6 > x_5 > x_4 > x_1 = x_2 > x_3 > x_7 > x_8$ ，此时模块的薄弱环节为  $x_6$ ，模块故障排查和优化依次从 FPGA 电路开始。

### 3 结论

笔者基于 T-S 动态故障树建立核电厂 DCS 系统输出模块可靠性分析模型，计算模块的失效概率和重要度特征量，得到以下结论：

1) 笔者用模糊子集代替精确的失效率描述底事件，并引入区间变量描述模糊子集的上下边界，有效解决了底事件失效率固化取值造成信息丢失和模糊子集上下边界值难以确定的问题，更加贴近工程实际。

2) 笔者提出的区间 T-S 模糊故障树模型能够灵活地处理不确定性信息，解决了传统故障树在分析输出模块时存在的局限性，提高了故障树分析法在核电 DCS 系统的适用性。

3) 笔者借助 T-S 门和 T-S 规则增强了传统故障树在处理 DCS 系统输出模块不确定性问题的能力，但是依旧属于静态分析模型，没有考虑到动态失效特性；因此，有必要作进一步的研究。

### 参考文献：

[1] 江国进, 李富, 孙伟, 等. 基于 PSA 技术的核电厂数字化仪控系统可靠性设计及应用[J]. 核动力工程, 2019, 40(2): 99-104.

[2] YANG J, YANG Y, WANG J, et al. Reliability Evaluation of TGN15 Type IGBT Traction Inverter for Beijing Metro[C]. 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Zhang Jiajie, China, 2019: 577-583.

[3] AHSAN M, HON S T, BATUNLU C, et al. Reliability Assessment of IGBT Through Modelling and

Experimental Testing[J]. in IEEE Access, 2020, 8: 9561-9573.

- [4] BAILEY C, LU H, YIN C, et al. Predictive Reliability, Prognostics and Risk Assessment for Power Modules[C]. 5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg, Germany, 2008: 1-7.
- [5] SCHEUERMANN U. Reliability of pressure contacted intelligent integrated power modules[C]. Proceedings of the 14th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, Sante Fe, NM, USA, 2002: 249-252.
- [6] 张怡. 分散控制系统 I/O 模块的可靠性分析及安全评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [7] 曾轲. Nicsys1000 系统 I/O 模块的可靠性分析及安全评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [8] 张朋. 核电厂数字化仪控系统故障建模及在线监测[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [9] 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.
- [10] 李鹏. 基于 T-S 模型的液压回转机构模糊故障树分析[J]. 机械工程与自动化, 2016(3): 118-120.
- [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.
- [12] 陈东宁, 姚成玉, 党振. 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的多态液压系统可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 899-905.
- [13] 陈东宁, 姚成玉. 基于模糊贝叶斯网络的多态系统可靠性分析及在液压系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 175-183.
- [14] 周宁, 崔汝卿, 许贝尔, 等. 基于 T-S 动态故障树的乙烯装置燃爆事故动态风险分析[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(7): 36-39.
- [15] 李兴运, 齐金平. 基于 T-S 模糊故障树的受电弓系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 33-38.
- [16] RUIJUN Z, LULU Z, NANNAN W, et al. Reliability evaluation of a multi-state system based on interval-valued triangular fuzzy Bayesian networks[J]. International journal of systems assurance engineering and management, 2016, 7(1): 16-24.
- [17] 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): 190-198.
- [18] 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(11): 5-12.
- [19] 陈舞, 张国华, 王浩, 等. 基于 T-S 模糊故障树的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价[J]. 岩土力学, 2019(A01): 319-328.