

基于 T-S 模糊故障树的改进型前盖 开闭装置故障研究

成永超¹, 穆连运²

(1. 海军潜艇学院 学员二大队, 山东 青岛 266199;
2. 海军潜艇学院 战略导弹与水中兵器系, 山东 青岛 266199)

摘要 针对改进型前盖开闭装置液压回路的特点, 用 T-S 模糊故障树方法对其进行故障分析, 通过各部件故障概率或故障程度模糊可能性计算出整个装置的故障程度与出现故障的模糊可能性, 对改进型前盖开闭装置液压回路的安全性、可靠性设计提供依据。T-S 模糊故障树分析法在分析过程中不需要精确的底事件的故障概率和大量历史数据, 较传统故障树分析法有一定优势, 能找出系统的薄弱环节, 在装备可靠性设计中具有一定的应用前景。

关键词 T-S 模糊门; T-S 模糊故障树; 前盖开闭装置; 改进型

中图分类号 TJ63 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)02-0172-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.014

Fault Research of Improved Front Cover Opening and Closing Device Based on T-S Fuzzy Fault Tree

CHENG Yongchao¹, MU Lianyun²

(1. 2nd Brigade of Trainees, PLA Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China; 2. Department of Strategic Missile and Underwater Weapon, PLA Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

Abstract According to the characteristics of the hydraulic circuit of the improved front cover opening and closing device, the T-S fuzzy fault tree is used to analyze its fault. Through the fuzzy possibility of failure probability or failure degree of each component, the fuzzy possibility of fault and the fault degree of the whole device are calculated, which provides a basis for the safety and reliability design of the hydraulic circuit of the improved front cover opening and closing device. The T-S fuzzy fault tree analysis method doesn't need accurate fault probability of bottom events and a large amount of historical data in the analysis process, which has certain advantages over the traditional fault tree analysis method. It can find the weak links of the system and has a certain application prospect in reliability design of equipment.

Key words T-S fuzzy gate; T-S fuzzy fault tree; front cover opening and closing device; improved type

0 引言

潜艇在发射鱼雷时会因发射装置工作而产生一定的噪声, 其中, 鱼雷发射系统前盖因开启、关

闭瞬间所产生的撞击噪声是其噪声的重要来源, 对保持潜艇隐蔽性有很大危害。为了尽量降低这个噪声, 实践中正在探讨对前盖开闭装置进行改进设计, 该装置通过在液压回路中增加“高速开

“高速开关阀”等精确控制液压缸工作行程运动速度, 由固定的速度变为可控的速度, 主要是相对降低行程终端和始端的运动速度, 从而降低前盖开启、关闭瞬间的撞击噪声。实践证明, 这是一项费效比较高的举措。

鱼雷作为水下作战的主要兵器, 对其发射系统性能和可靠性有很高要求, 前盖是否能够及时、正常开闭, 是鱼雷能否顺利发射的前提。增加“高速开关阀”后, 开闭装置由定速变为变速, 工作可靠性受到明显影响, 因此, 对改进后的装置进行安全性和可靠性分析, 纳入整体改进方案十分必要。

1 改进型前盖开闭装置液压控制回路

改进型鱼雷发射系统前盖开闭装置为实现前盖开、闭的精确控制, 主要对其液压控制回路及其控制模块进行了改进。在液压控制回路中增加了高速开关阀、位移传感器及相应的 PC 控制模块等, 相较传统装置^[1]更加复杂, 是分析改进型前盖开闭装置安全性和可靠性的重点, 其液压控制回路原理图如图 1 所示。

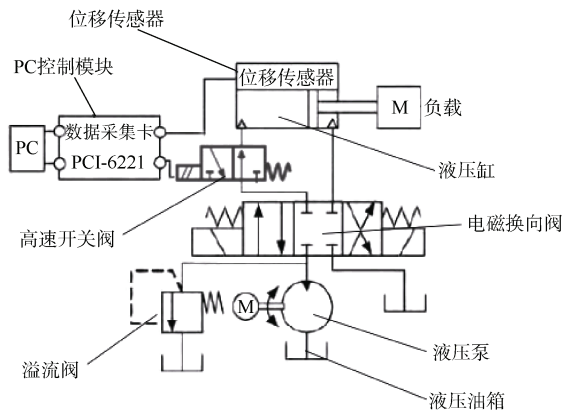


图 1 改进型前盖开闭装置液压控制回路原理图
Fig. 1 Hydraulic control loop of improved front cover opening and closing device

2 T-S 模糊故障树模型分析

故障树分析方法 (FTA) 是用于分析系统安全性和可靠性的方法之一^[2]。传统的故障树分析方法是结合布尔运算和概率论理论, 能够直观有效地分析某些复杂系统的可靠性^[3]。但是传统的故障树分析法在改进型前盖开闭装置故障分析中存在以下不

足: 1) 改进型前盖开闭装置正处于设计开发阶段, 历史数据匮乏, 不能精确描述底事件的故障概率^[4]; 2) 装置发生故障的严重程度无法进行确切的描述; 3) 各故障间的关系是复杂的、模糊的, 不能只运用“与”门或者“或”门来进行描述^[5]。

由于模糊逻辑理论可以处理模糊的不确定的信息, 能够很好的改善故障树分析法的不足, 因此, 本文将模糊理论与故障树分析法相结合, 利用 T-S 模糊故障树 (TS-FTA) 对改进型前盖开闭装置液压控制回路进行故障分析, 为装备的改进开发提供合理的依据。

通过将 T-S 门取代传统逻辑“与”门和“或”门, 用模糊数描述故障发生的概率及故障程度, 从而构造 T-S 模糊故障树^[6-7]。图 2 是一个典型的 T-S 模糊故障树, 其中 x_1, x_2, x_3 为底事件, T-S 门 1 和 T-S 门 2 为 T-S 模糊门, y_1 为中间事件, y_2 为顶事件。

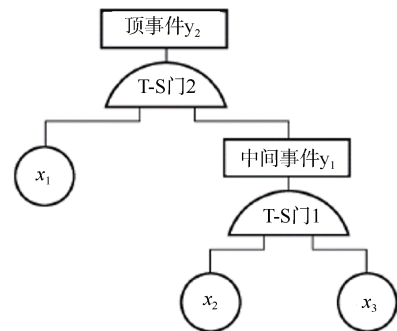


图 2 T-S 模糊故障树
Fig. 2 Fault tree based on T-S door

2.1 事件描述

前盖开闭装置各部件的故障发生概率和故障程度采用模糊数表示, 故障程度采用区间 $[0,1]$ 上的模糊数来描述, 故障程度可分为无故障、轻度故障、严重故障 3 个等级, 分别用模糊数 0, 0.5, 1 来描述。

本文中模糊数的隶属函数表示为梯形隶属函数 F 。

$$F = (F_0, s_l, m_l, s_r, m_r) \quad (1)$$

式中: F_0 为支撑集的中心; s_l 为左支撑半径; s_r 为右支撑半径; m_l 为左模糊区; m_r 为右模糊区。

梯形隶属函数 F 可由图 3 表示, μF 为故障发生概率和故障程度的模糊数。

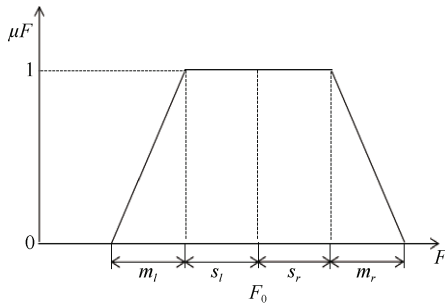


图 3 梯形模糊数的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of trapezium fuzzy numbers

由图 3 可知, 故障发生概率和故障程度的模糊数 μF 为

$$\mu F = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq F \leq F_0 - s_l - m_l \\ \frac{F - (F_0 - s_l - m_l)}{m_l} & , \quad F_0 - s_l - m_l < F \leq F_0 - s_l \\ 1 & , \quad F_0 - s_l < F \leq F_0 + s_r \\ \frac{F_0 + s_r + m_r - F}{m_r} & , \quad F_0 + s_r < F \leq F_0 + s_r + m_r \\ 0 & , \quad F_0 + s_r + m_r < F \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 T-S 模糊算法

T-S 模糊模型由一系列 IF-THEN 模糊规则组成, 能根据底事件模糊可能性推算出顶事件的模糊可能性^[8]。T-S 模糊模型可表述如下。

已知 T-S 模糊门的规则 $l(l=1,2,\dots,m)$;

如果 z_1 为 s_{l_1} , 且 z_2 为 s_{l_2} , 且..., 则 Y 为 Y_l 。

其中: $z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_\rho]^T$ 为前件变量, s_{l_j} 为模糊集。设模糊集的隶属度函数为 $\mu_{s_{l_j}}(z_j)$, 则 T-S 模糊模型的输出为 Y 。

$$Y = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(z) Y_l \quad (3)$$

式中, $\beta_l^*(z)$ 满足

$$\sum_{l=1}^m \beta_l^*(z) = 1, \quad l=1,2,\dots,m$$

$$0 \leq \beta_l^* \leq 1$$

可用如下公式计算:

$$\beta_l^* = \beta_l(z) / \sum_{l=1}^m \beta_l(z) \quad (4)$$

式中, $\beta_l(z)$ 为模糊规则 l 的执行度, 计算如下:

$$\beta_l(z) = \prod_{j=1}^{\rho} \mu_{s_{l_j}}(z_j) \quad (5)$$

假设基本事件 x_1, x_2, \dots, x_n 和上级事件 Y 的故障程度分别描述为模糊数 $(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k_1}), \dots, (x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{k_n})$ 和 $(y^1, y^2, \dots, y^{k_y})$, 其中

$$\begin{cases} 0 \leq x_1^1 \leq x_1^2 \leq \dots \leq x_1^{k_1} \leq 1 \\ 0 \leq x_2^1 \leq x_2^2 \leq \dots \leq x_2^{k_2} \leq 1 \\ \vdots \\ 0 \leq x_n^1 \leq x_n^2 \leq \dots \leq x_n^{k_n} \leq 1 \\ 0 \leq y^1 \leq y^2 \leq \dots \leq y^{k_y} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

则 T-S 模糊门可表示为下列模糊规则。

已知 T-S 模糊门的规则 $l(l=1,2,\dots,m)$;

如果 x_1 为 $x_1^{i_1}$, 且 x_2 为 $x_2^{i_2}$... 且 x_n 为 $x_n^{i_n}$, 则 Y 为

y^l 的可能性为 $P^l(y^1)$, y^2 的可能性为 $P^2(y^2)$, ..., y^{k_y} 的可能性为 $P^l(y^{k_y})$ 。其中: $i_1=1,2,\dots,k_1$, $i_2=1,2,\dots,k_2$, ..., $i_n=1,2,\dots,k_n$; m 为规则总数, 满足 $m = k_1 k_2 \dots k_n$ 。

记 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 若已知基本事件的故障程度为 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, 则由 T-S 模型可估计出上级事件故障程度的模糊可能性:

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^n) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^n) \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$\beta_l^* = \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^{i_j}} / \sum_{l=1}^m \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^{i_j}}(x'_j) \quad (8)$$

式中, $\mu_{x_j^{i_j}}(x'_j)$ 表示第 l 条规则中 x'_j 对相应模糊集的隶属度。

假设基本事件各种故障程度的模糊可能性为 $P(x_1^{i_1})(i_1=1,2,\dots,k_1)$, ..., $P(x_n^{i_n})(i_n=1,2,\dots,k_n)$, 则规则 $l(l=1,2,\dots,m)$ 执行可能性为

$$P^l = P(x_1^{i_1}) P(x_2^{i_2}) \dots P(x_n^{i_n})$$

因此上级事件的模糊可能性为

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^n) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^n) \end{cases} \quad (9)$$

根据 T-S 模糊门算法, 我们可得:

- 1) 由下级事件的模糊可能性利用式 (9) 可得出上级事件的模糊可能性;
- 2) 由下级事件的当前状态利用式 (7) 可估计出上级事件的模糊可能性。

3 改进型前盖开闭装置液压控制回路模糊故障树分析

改进型前盖开闭装置液压控制回路主要由信号控制部分、液压部分和传动机构组成, 对液压回路进行故障树分析, 为液压回路的安全性可靠性设计提供依据。

3.1 改进型前盖开闭装置液压控制回路 T-S 模型故障树

本文采用 T-S 模糊故障树对改进型鱼雷发射系统前盖开闭装置液压控制回路进行具体分析, 其 T-S 模糊故障树如图 4 所示。其中, 顶事件 T 为 T-S 门 1 的输出, 代表改进型前盖开、闭装置故障; 中间事件 $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$, 分别为 T-S 门 2、T-S 门 3、T-S 门 4 和 T-S 门 5 的输出, 分别代表控制信号部分、液压部分、液压油源和液压阀故障; 各底事件 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_9\}$, 分别为传动机构、位移传感器、PC 控制模块、液压油缸、液压油、电动机、溢流阀、电磁换向阀和高速开关阀。

假设事件 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 和 $x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ 的常见故障程度为 $(0, 0.5, 1)$, 模糊隶属函数选为 $s_l = s_r = 0.1, m_l = m_r = 0.3, x_3$ 的常见故障为 $(0, 1)$, 模糊隶属函数选为 $s_l = s_r = 0.25, m_l = m_r = 0.5$ 。根据经验和专家数据得出 T-S 模糊门规则如表 1-5 所示。

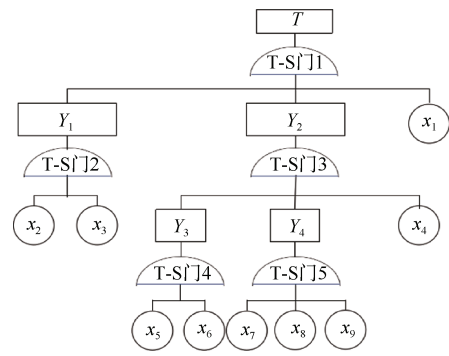


图 4 改进型前盖开闭装置液压回路的 T-S 模糊故障树
Fig. 4 T-S fuzzy fault tree of hydraulic circuit of improved front cover opening and closing device

表 1 T-S 模糊门 1 规则
Table 1 T-S fuzzy door 1 rule

规则	x_1	Y_1	Y_2	T		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.3	0.4	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.1	0.4	0.5
5	0	0.5	0.5	0.1	0.3	0.6
6	0	0.5	1	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0.5	0	0	1
9	0	1	1	0	0	1
...
27	1	1	1	0	0	1

表 2 T-S 模糊门 2 规则
Table 2 T-S fuzzy door 2 rule

规则	x_2	x_3	Y_1		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1
3	0.5	0	0.2	0.3	0.5
4	0.5	1	0	0	1
5	1	0	0	0	1
6	1	1	0	0	1

表 3 T-S 模糊门 3 规则
Table 3 T-S fuzzy door 3 rule

规则	Y_3	Y_4	x_4	Y_2		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.3	0.4	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.2	0.4	0.4
5	0	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5
6	0	0.5	1	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0.5	0	0	1
9	0	1	1	0	0	1
...
27	1	1	1	0	0	1

表 4 T-S 模糊门 4 规则
Table 4 T-S fuzzy door 4 rule

规则	x_5	x_6	Y_3		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.3	0.4	0.3
3	0	1	0	0	1
4	0.5	0	0.1	0.5	0.4
5	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0	1
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

表 5 T-S 模糊门 5 规则
Table 5 T-S fuzzy door 5 rule

规则	x_7	x_8	x_9	Y_4		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.3	0.4	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.1	0.5	0.4
5	0	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5
6	0	0.5	1	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0.5	0	0	1
9	0	1	1	0	0	1
...
27	1	1	1	0	0	1

3.2 已知底事件发生的模糊可能性计算顶事件发生的模糊可能性

改进型前盖开闭装置液压控制回路各部件的故障率如表 6 所示。

表 6 各部件故障率
Table 6 Failure rate of each component

部件	故障率 $\times 10^{-6}$	部件	故障率 $\times 10^{-6}$	部件	故障率 $\times 10^{-6}$
x_1	2.4	x_4	3.2	x_7	1.2
x_2	14.6	x_5	7.4	x_8	2.7
x_3	2.2	x_6	2	x_9	0.8

表 6 中的数据显示的是各部件故障程度为 1 时的模糊可能性，若 $x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ 的故障程度为 0.5 时的概率与其为 1 时的概率数相同，则可根据表 2、表 4、表 5 和公式 (9) 得到控制信号部分 Y_1 、液压油源 Y_3 和液压阀故障 Y_4 的模糊故障可能性，如表 7 所示。

由表 3 及表 7 数据可以得到液压部分 Y_2 的故障模糊可能性：

$$P(Y_2 = 0.5) = \sum_l^{27} P_0^l P^l(Y_2 = 0.5) = 1.82 \times 10^{-6}$$

$$P(Y_2 = 1) = \sum_l^{27} P_0^l P^l(Y_2 = 1) = 22.71 \times 10^{-6}$$

表 7 Y_1, Y_3, Y_4 的模糊可能性

Table 7 Fuzzy probability of Y_1, Y_3, Y_4

事件	T	
	0.5	1
$Y_1 (10^{-6})$	4.38	24.1
$Y_3 (10^{-6})$	3.7	12.96
$Y_4 (10^{-6})$	1.35	7.22

由表 1 及以上数据可以得到改进型鱼雷发射装置前盖开、闭故障 T 的故障模糊可能性:

$$P(T = 0.5) = \sum_l^{27} P_0^l P^l(T = 0.5) = 2.48 \times 10^{-6}$$

$$P(T = 1) = \sum_l^{27} P_0^l P^l(T = 1) = 54.346 \times 10^{-6}$$

由上述计算结果可知, 各系统发生故障的模糊可能性与各部件故障的模糊可能性大致在一个数量级上, 而且上一级出现故障程度为 1 的概率大于下一级的故障概率, 这与我们的实际经验相一致。由此方法我们可以根据系统各部件的故障概率预测出整个系统的故障概率, 从而在设计时就系统的安全性可靠性考虑在内, 为系统设计提供依据。

3.3 已知底事件的故障程度计算顶事件故障程度的模糊可能性

假设已知底事件 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)$ 的故障程度为 $x' = (x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, x'_5, x'_6, x'_7, x'_8, x'_9)$, 假设已知 $x'_1 = 0.1, x'_2 = 0.2, x'_3 = 0, x'_4 = 0.3, x'_5 = 0.2, x'_6 = 0.1, x'_7 = 0.2, x'_8 = 0.3, x'_9 = 0.6$, 根据公式 (7) 和公式 (8) 可计算出中间事件 Y_1, Y_3, Y_4 故障程度的模糊可能性见表 8 所示。

表 8 Y_1, Y_3, Y_4 故障程度的模糊可能性

Table 8 Fuzzy probability of degree of Y_1, Y_3, Y_4

事件	模糊可能性		
	0	0.5	1
Y_1	0.733 333	0.1	0.166 667
Y_3	0.7	0.166 667	0.133 333
Y_4	0.111 111	0.266 667	0.622 222

计算中间事件 Y_2 故障程度的模糊可能性时, 用 Y_3, Y_4 的故障程度的模糊可能性代替各自的隶属度, 根据公式 (9), 计算得中间事件 Y_2 的故障程度

的模糊可能性为

$$P(Y_2 = 0.5) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(Y_2 = 0.5) = 0.0954$$

$$P(Y_2 = 1) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(Y_2 = 1) = 0.8382$$

按照相同的方法计算出顶事件 T 故障程度的模糊可能性为

$$P(T = 0.5) = 0.0335$$

$$P(T = 1) = 0.8952$$

根据以上结果可知, 当位控制信号部分和液压部分出现严重故障, 传动机构出现轻微故障时, 改进型前盖开闭装置出现严重故障的概率较大, 为系统可靠性设计提供依据。

4 结束语

本文运用 T-S 模糊故障树模型对改进型前盖开闭装置液压回路进行故障分析, 根据底事件发生的模糊可能性计算出整个装置发生故障和各种故障程度的模糊可能性, 找出了系统的薄弱环节, 从而为液压回路的设计改进提供了依据。T-S 模糊故障树分析法克服了传统故障树分析需要大量历史精确数据和各部件间精确的联系的缺点, 使得分析更符合实际、结论更为准确, 此方法在系统可靠性设计中具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 练永庆, 王树宗. 鱼雷发射装置设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 凯拉什·卡布尔, 迈克尔·科佩希特. 可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [3] 姚成玉, 赵静一. 液压系统模糊故障树分析方法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(14): 1656-1659, 1675.
- [4] 曲恩泽, 卢松. 故障分析法在航空故障油泵车故障诊断中的应用[J]. 空军勤务学院学报, 2018, 29(2): 67-71.
- [5] 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.
- [6] 李若铭. 基于 T-S 模糊模型的防空导弹控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 梁芬, 王振. 基于 T-S 模糊故障树的焊接机可靠性分析[J]. 机械强度, 2017, 39(3): 592-597.
- [8] 姚成玉, 张茨驿, 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.

(责任编辑: 肖楚楚)