

doi: 10.7690/bgzdh.2016.11.011

# 基于模糊集理论的储运发射箱故障树分析

肖广元<sup>1</sup>, 申向军<sup>2</sup>, 李志刚<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 国营第七五三厂, 山西 太谷 030812)

**摘要:** 针对传统的故障诊断中因缺少大量统计数据难以准确获得故障发生概率的问题, 提出一种基于模糊集理论的故障树分析方法。利用故障树分析方法对储运发射箱故障进行研究, 建立储运发射箱故障树模型。结合专家组对故障发生概率等级评定, 对专家评定意见进行模糊化处理, 将模糊集理论与专家评判相结合, 获得事件的发生概率。对故障树进行分析, 得到系统的顶事件模糊发生概率与各最小割集的模糊临界重要度。计算结果表明: 该方法能够确定由各最小割集所引起顶事件发生的可能性大小, 可为储运发射箱的故障诊断决策以及可靠性分析提供帮助。

**关键词:** 储运发射箱; 模糊故障树; 模糊重要度; 可靠性

**中图分类号:** TJ768.1 **文献标志码:** A

## Fault Tree Analysis of Launching Canister Based on Fuzzy Theory

Xiao Guangyuan<sup>1</sup>, ShenXiangjun<sup>2</sup>, Li Zhigang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. State-operated No. 753 Factory, Taigu 030812, China)

**Abstract:** Due to the lack of abundant data, the probability of failure cannot be obtained accurately in traditional fault diagnosis. To solve this problem, a new method based on fault tree analysis (FTA) with fuzzy set theory was provided. By FTA, a fault model of launching canister was constructed. Combining expert group to assess the probability of failure occurrence, fuzzy processing of expert opinion, combining fuzzy set theory and expert evaluation, to obtain the probability of occurrence of the event. The fault tree is analyzed to obtain the fuzzy critical importance of the top event probability and the minimum cut set of the system. The result showed that: the proposed method could confirm the possibility of top event caused by each minimal cutset and provide a support for the decision of fault diagnosis and reliability analysis of launching canister.

**Keywords:** launching canister; fuzzy fault tree; fuzzy importance; reliability

### 0 引言

储运发射箱作为火箭弹的载体, 在储存、运输和发射过程中起到支撑保护的作用。储运发射箱的性能是否良好, 直接影响到火箭武器的战斗性能, 一旦在发射过程中出现故障, 对作战会造成极大的影响<sup>[1]</sup>。故障树分析 (fault tree analysis, FTA) 法作为一种针对某个特定不希望事件的演绎推理分析方法, 将系统中最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标, 逐级分析发生故障原因, 并对系统进行故障概率计算。传统的故障树分析把事件发生的概率处理成为一个精确值, 这需要大量的统计数据, 然而, 在一些实验周期较长的情况下, 想获取事件发生的精确概率很困难。在这种情况下, 凭借专家的历史经验, 以自然语言的表述形式对事件的失效可能性作出客观评估。采用概率刻度法 (probability scale) 对专家经验判断进行概率量化<sup>[2]</sup>, 结合模糊集理论 (fuzzy set theory) 将底事件失效概率用模糊数来表示<sup>[3]</sup>, 并进行故障概率计算, 充分利用现有数据并考虑数据的不完备性, 在故障诊断中发挥重要

作用。

### 1 模糊故障树分析方法

#### 1.1 模糊数的表示

设论域为  $U$  实数域  $R$ ,  $\tilde{p}$  表示“大约为  $m$ ”的模糊数,  $\mu_{\tilde{p}}(x)$  为  $\tilde{p}$  的隶属度函数。模糊数  $\tilde{p}$  的隶属度函数可以有多种形式, 以三角模糊数<sup>[4]</sup>为例, 如图 1 所示。

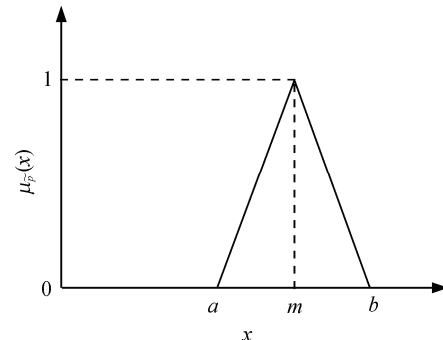


图 1 三角模糊数隶属度函数曲线

该函数可表示为:

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-09-19

作者简介: 肖广元(1992—), 男, 贵州人, 硕士, 从事武器系统可靠性研究。

$$\mu_{\tilde{p}}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ \frac{x-a}{m-a} & (a \leq x < m) \\ \frac{b-x}{b-m} & (m \leq x \leq b) \\ 0 & (x > b) \end{cases} \quad (1)$$

为方便计算，笔者将模糊数  $\tilde{p}$  用  $m, \alpha, \beta$  3 个参数表示，如图 2 所示。

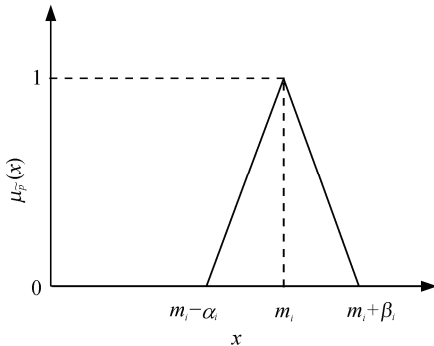


图 2  $\tilde{P}$  的隶属度函数曲线

$$\tilde{p} = (m - \alpha, m, m + \beta)。$$

式中： $m$  为模糊数  $\tilde{p}$  的均值； $\alpha, \beta$  分别为模糊数  $\tilde{p}$  的左右模糊半径。其对应  $\lambda$  的截集为

$$P_{\lambda} = [(m - \alpha) + \lambda\alpha, (m + \beta) - \lambda\beta]。$$

### 1.2 模糊算子的表示

在故障树分析中，将底事件发生的概率用模糊数来描述，同时将逻辑门算子用模糊算子代替，从而求得顶事件的模糊发生率。

1) 对于与门，其模糊算子为

$$P_{\lambda}^{\text{and}} = \prod_{i=1}^n P_{i\lambda} = \left[ \prod_{i=1}^n [(m_i - \alpha_i) + \lambda\alpha_i], \prod_{i=1}^n [(m_i + \beta_i) - \lambda\beta_i] \right] \quad (2)$$

2) 对于或门，其模糊算子为

$$P_{\lambda}^{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{i\lambda}) = \left[ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i - \alpha_i) - \lambda\alpha_i], 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i + \beta_i) + \lambda\beta_i] \right] \quad (3)$$

## 2 储运发射箱故障树实例

### 2.1 故障树模型建立

储运发射箱作为火箭弹的载体，其最终功能为保证火箭弹发射，同时不影响其精度<sup>[5]</sup>。根据其结构特点，笔者建立储运发射箱故障树如图 3 所示。其中，矩形为顶事件或中间事件；圆形为底事件；菱形为存在但不许再细分的事件。

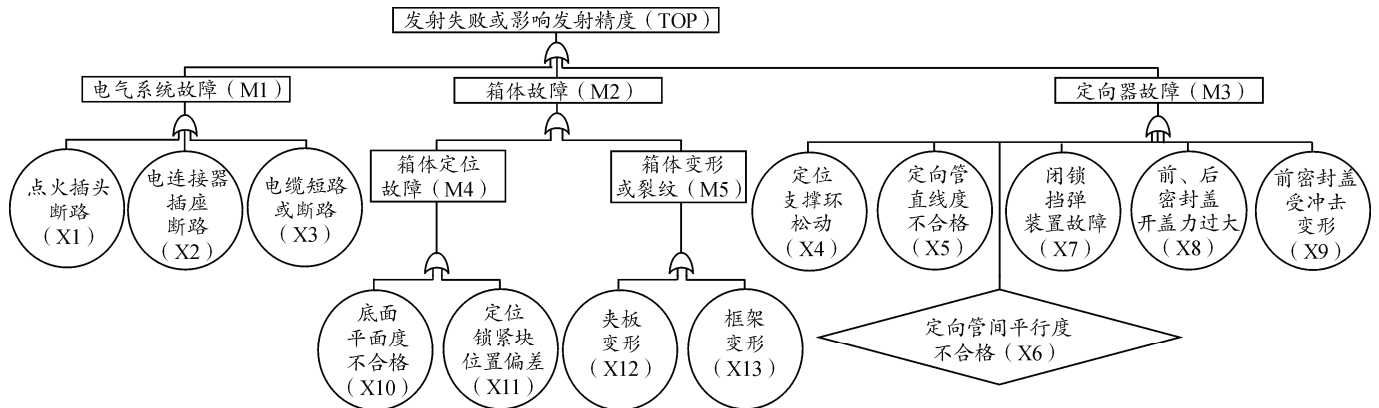


图 3 储运发射箱故障树

根据故障发生的概率，可将故障发生可能性分为 5 个等级，见表 1。

表 1 故障可能性等级分类

等级	等级说明	个体发生情况	总体发生情况
A	频繁	频繁发生	连续发生
B	很可能	在寿命期内会发生若干次	经常发生
C	有时	在寿命期内可能有时发生	发生若干次
D	极少	在寿命期内不易发生，但可能发生	不易发生，但有理由预期可能发生
E	几乎不可能	很不易发生	不易发生，但有可能发生

表 2 各底事件故障可能性等级

代号	事件名称	可能性等级
X1	点火插头断路	D
X2	电连接器插座断路	D
X3	电缆短路或断路	D
X4	定位支撑环松动	E
X5	定向管直线度不合格	D
X6	定向管间平行度不合格	D
X7	闭锁挡弹装置故障	E
X8	前、后密封盖开盖力过大	E
X9	前密封盖受冲击变形	E
X10	底面平面度不合格	D
X11	定位锁紧块位置偏差	D
X12	夹板变形	D
X13	框架变形	D

经专家组评定，各底事件失效发生可能性等级见表 2。

## 2.2 底事件概率计算

### 2.2.1 可能性等级模糊化处理

为了解决因数据缺乏导致部件失效概率难以确定的问题，将专家评定失效可能性等级模糊化处理。把模糊可能性等级分为“频繁(A)”“很可能(B)”“有时(C)”“极少(D)”“几乎不可能(E)”5个等级，其对应模糊数为：

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{p}_A &= (0.8, 1.0, 1.0) \\ \widetilde{p}_B &= (0.6, 0.75, 0.9) \\ \widetilde{p}_C &= (0.3, 0.5, 0.7) \\ \widetilde{p}_D &= (0.1, 0.25, 0.4) \\ \widetilde{p}_E &= (0, 0, 0.2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 2.2.2 模糊失效率计算

为了获取底事件失效模糊概率，先将失效可能性等级模糊数进行去模糊化处理，得到一个较为精确的概率值。再对该概率值进行处理，获得一个与常规故障概率相吻合的故障概率。

笔者采用均值面积法<sup>[6]</sup>对可能性等级模糊数进行去模糊化处理，对与上述 $\widetilde{p}_i = (a_i, m_i, b_i)$ 三角模糊数，处理后得到精确概率值：

$$P_i = (a + 2m + b) / 4 \quad (5)$$

将获得的精确概率值与常规概率相匹配，转化得到模糊失效率 (fuzzy failure rate)：

$$\text{FFR} = \begin{cases} 1/10^K, P_i \neq 0 \\ 0, P_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $K = 2.301 \times [(1 - P_i / P_i)]^{1/3}$ 。

以求出的模糊失效率的50%作为其左右模糊半径，即为事件的失效模糊数。

## 2.3 故障树顶事件概率计算

根据专家评定故障树各底事件的可能性等级，结合式(5)、式(6)计算得出个底事件的模糊故障率，见表 3。根据所绘出的故障树，顶事件 T 可表示为：

$$T1 = M1 + M2 + M3。$$

式中：M1 = X1 + X2 + X3；

M2 = M4 + M5；

M3 = X4 + X5 + X6 + X7 + X8；

M4 = X10 + X11；

M5 = X12 × X13。

表 3 各底事件故障率模糊数

底事件代号	$m_i$	$\alpha_i, \beta_i$
X1	0.000 48	0.000 24
X2	0.000 48	0.000 24
X3	0.000 48	0.000 24
X4	$7.5 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-7}$
X5	0.000 48	0.000 24
X6	0.000 48	0.000 24
X7	$7.5 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-7}$
X8	$7.5 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-7}$
X9	$7.5 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-7}$
X10	0.000 48	0.000 24
X11	0.000 48	0.000 24
X12	0.000 48	0.000 24
X13	0.000 48	0.000 24

将各事件关系用模糊数表示，得到顶事件模糊数计算公式：

$$\widetilde{p}_{M1} = \widetilde{p}_{X1} \oplus \widetilde{p}_{X2} \oplus \widetilde{p}_{X3}；$$

$$\widetilde{p}_{M2} = \widetilde{p}_{X10} \oplus \widetilde{p}_{X11} \oplus \widetilde{p}_{X12} \otimes \widetilde{p}_{X13}；$$

$$\widetilde{p}_{M3} = \widetilde{p}_{X4} \oplus \widetilde{p}_{X5} \oplus \widetilde{p}_{X6} \oplus \widetilde{p}_{X7} \oplus \widetilde{p}_{X8} \oplus \widetilde{p}_{X9}；$$

$$\widetilde{p}_T = \widetilde{p}_{M1} \oplus \widetilde{p}_{M2} \oplus \widetilde{p}_{M3}。$$

根据模糊算子，计算得到顶事件及各中间事件故障率的模糊数，见表 4。

表 4 顶事件及中间事件故障率模糊数

底事件代号	$m_i$	$\alpha_i, \beta_i$
M1	0.001 44	0.000 72
M2	0.000 96	0.000 48
M3	0.000 96	0.000 48
T	0.003 36	0.001 68

## 3 模糊重要度计算

重要度是故障树定量分析的主要任务之一，根据结构函数和底事件的发生概率，应用逻辑与、逻辑或的概率计算公式，对各底事件的重要度进行计算。底事件的重要度在改善系统的设计、确定系统需要监控的部位、确定故障诊断方案方面有着重要的作用。工程中常计算的重要度有结构重要度、概率重要度和临界重要度 3 种。

常规的重要度分析以精确的事件失效概率为基础，但在实际工程中，有时无法获得充足的数据，这时，模糊重要度<sup>[6]</sup>分析的优势就能体现出来。

### 3.1 模糊概率重要度

由常规重要度分析，可得概率重要的定义为

$$I_p(i) = \frac{\partial P_T(q)}{\partial q_i} = P_T(1_i, q) - P_T(0_i, q) \quad (7)$$

式中： $P_T(1_i, q)$ 表示当该底事件发生时顶事件的发生概率； $P_T(0_i, q)$ 表示当该事件不发生时顶事件的发生概率。

概率重要度表示底事件发生概率变化时所引起的顶事件发生概率的大小，将模糊集理论与底事件重要度相结合，底事件发生概率用模糊数 $\widetilde{p}_i$ 表示，

其隶属度为  $\mu_{\widetilde{p}_T}$ ，顶事件发生概率模糊数为  $\widetilde{p}_T$ ，其隶属度表示为  $\mu_{P_T}$ 。

$$\mu_{P_T} = \min(\mu_{P_{x_1}}, \mu_{P_{x_2}}, \mu_{P_{x_3}}, \mu_{P_{x_4}}, \dots, \mu_{P_{x_n}}) \quad (8)$$

此时，笔者把底事件的模糊概率重要度定义为：

$$FI_p(i) = E(\widetilde{P_{Ti1}} - \widetilde{P_{Ti0}}) = \frac{\int_0^1 x \mu_{P_{Ti1}}(x) dx}{\int_0^1 \mu_{P_{Ti1}}(x) dx} - \frac{\int_0^1 x \mu_{P_{Ti0}}(x) dx}{\int_0^1 \mu_{P_{Ti0}}(x) dx} \quad (9)$$

### 3.2 模糊临界重要度

模糊概率重要度虽然能反映出改变底事件发生概率对顶事件发生概率的影响大小，使得在改善系统的设计时，可以通过改变对应底事件的发生概率达到改善系统的目的<sup>[7]</sup>。但是，实际上改变发生概率大的底事件的概率往往要比减少概率较小的事件概率容易，概率重要度不能反映出这个问题，此时，就需要引入临界重要度。

临界重要度又称关键重要度<sup>[8]</sup>，从系统安全的角度来考虑，用基本事件发生概率的相对变化率与顶事件发生概率的相对变化率之比来表示基本事件的重要度，即从敏感度和自身发生概率的双重角度衡量各基本事件的重要度标准，能够反映零部件触发系统故障可能性的大小。临界重要度的定义为

$$I_c(i) = \frac{\partial g}{g} \bigg/ \frac{\partial q_i}{q_i} \quad (10)$$

临界重要度与概率重要度的关系为

$$I_c(i) = \frac{q_i}{g} I_p(i) \quad (11)$$

将临界重要度用模糊数表示，得出模糊临界重要度与模糊概率重要度的关系：

$$FI_c(i) = \frac{q_i}{g} FI_p(i) \quad (12)$$

### 3.3 最小割级模糊临界重要度计算

#### 3.3.1 确定故障树最小割集

采用 fussell 法(又称下行法)寻找故障树最小割集。故障树中的与门只会增大割集的容量，或门只会增加割集的数目。从顶事件开始，逐渐向下，用输入事件置换输出事件，把与门的输入写成一行，把或门的输入写成一行，直到完全变成底事件(含省略事件)的矩阵为止。

由上述方法求解得到故障树最小割集为：

$$\{X1\}、\{X2\}、\{X3\}、\{X4\}、\{X5\}、\{X6\}、\{X7\}、\{X8\}、\{X9\}、\{X10\}、\{X11\}、\{X12, X13\}。$$

#### 3.3.2 模糊临界重要度计算

结合式(9)和式(12)与表 3 中各底事件的概率模糊数，对各最小割集的临界重要度进行求解。最终计算出各最小割集临界重要度如表 5。

表 5 各最小割集临界重要度

底事件代号	$m_i$	$FI_c$
X1	0.000 48	0.142
X2	0.000 48	0.142
X3	0.000 48	0.142
X4	$7.5 \times 10^{-7}$	$2.23 \times 10^{-4}$
X5	0.000 48	0.142
X6	0.000 48	0.142
X7	$7.5 \times 10^{-7}$	$2.23 \times 10^{-4}$
X8	$7.5 \times 10^{-7}$	$2.23 \times 10^{-4}$
X9	$7.5 \times 10^{-7}$	$2.23 \times 10^{-4}$
X10	0.000 48	0.142
X11	0.000 48	0.142
X12、X13	$2.3 \times 10^{-7}$	$6.86 \times 10^{-5}$

## 4 结论

笔者对储运发射箱发射过程中，可能发生的故障进行模糊故障树分析，定性分析并确定了故障树的最小割集，根据专家组对事件发生的可能性评定，采取模糊化表示方法，转化得出了各底事件的发生概率，解决了因缺少大量实验数据难以获得准确故障发生概率的困难<sup>[9]</sup>。笔者对模糊故障树进行了定性及定量分析，求出了各最小割集并获得各最小割集的临界重要度，确定了由各最小割级所引起顶事件发生的可能性大小，进而为可靠性分析中的储运发射箱故障检测方法设计提供了一定的理论支持。

### 参考文献：

- [1] 刘栋, 李兴城, 李传军, 等. 多管火箭炮地面发射控制装置[J]. 兵工自动化, 2015, 34(1): 12-14.
- [2] Li B, Han T, Kang F. Fault diagnosis expert system of semiconductor manufacturing equipment using a Bayesian network[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(12): 1161-1171.
- [3] Yuhua D, Datao Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2): 83-88.
- [4] 刘胜, 张玉廷, 于大泳. 动态三角模糊数互反判断矩阵一致性修正[J]. 兵工学报, 2012, 33(2): 237-243.
- [5] 赵乙镔, 邢晓辰. 融合神经网络与证据理论的发射场试验信息处理方案设计[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 26-28.
- [6] 王永传, 郁文贤, 庄钊文. 一种故障树模糊重要度分析的新方法[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(3): 63-66.
- [7] 康云, 李淳, 戴振华. 基于 AHP 和模糊理论的通信装备技术保障能力评估[J]. 兵工自动化, 2015, 34(10): 89-92.
- [8] 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): 1261-1268.
- [9] 李田科, 于仕财, 范辉, 等. 导弹发射车车控设备故障诊断仪[J]. 兵工自动化, 2015, 34(12): 33-37.