

# 液体推进剂贮运可靠性模糊故障树方法研究

李新其, 刘祥萱, 李红霞

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

**摘 要:** 对液体推进剂在贮运过程中发生的泄漏情况进行了深入分析, 建立了故障树模型, 并讨论了底事件对泄漏事件的影响。针对实际情况下泄漏事件的发生概率具有模糊性和不确定性的特点, 将模糊集理论引入故障树分析法, 将基本底事件发生概率描述为一模糊数, 从而估算出整个系统的模糊故障率。该方法能快速准确的检测和诊断液体推进剂贮运的潜在故障, 对推进剂安全贮运有一定裨益。

**关键词:** 液体推进剂; 泄漏; 故障树; 模糊概率

中图分类号: V511

文献标识码: A

文章编号: (2004)05-0031-05

## Fuzzy Fault Tree Method of the Liquid Propellant Store and Transport Security Estimate and Forecast

Li Xinqi, Liu Xiangxuan, Li Hongxia

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

**Abstract:** This paper analyzes the leakage that may occur during the liquid propellant store and transport, builds up the leakage fault tree and discusses how the basic incident affects the leakage incident. Based on the fuzzy and uncertainty of the leakage incident probability, the fuzzy theory is introduced into the fault tree analysis method and the generate probability of the basic incident is described as a fuzzy data, then the fuzzy fault rate of the whole system is predicted. This method can quickly and accurately check and diagnose the potential fault of the liquid propellant store and transport, which would be benefit for liquid propellant safe store and transport.

**Key words:** liquid propellant; leakage; fault tree; fuzzy probability

### 1 引言

化学工业生产中所使用的各种物质或产品, 许多都是通过罐装或瓶装的形式来运输的, 而这

些贮罐(瓶)因物料本身的特征一般都会呈正压或负压状, 甚至是超高压或过低压状。当环境条件发生改变时这种贮罐就有可能发生破裂, 甚至引发爆炸。液体推进剂贮运的可靠性评估和预测

收稿日期: 2004-04-28; 修回日期: 2004-05-20。

作者简介: 李新其(1975—), 男, 硕士研究生, 研究领域为军事运筹、数学建模。

一直是推进剂贮运管理的重点和难点。

运用传统的故障树方法对某一系统的可靠性进行评估预测时,必须同时满足二个条件:一是各底事件的发生概率要明确可知;二是结构函数必须确立。就液体推进剂贮运系统而言,在给出泄漏事件的故障树模型之后,虽然可以据此确立结构函数  $\tilde{O}(x)$ ,但在不同条件下各底事件的发生概率却很难精确给出,这是因为在液体推进剂的实际贮运工作中,关于泄漏事件发生时各个底事件的概率信息往往所知较少,加之液体推进剂贮运系统结构较为复杂,引发系统泄漏的各种故障发生的概率具有很大的模糊性和不确定性。传统的故障树分析方法,很难处理这类同时存在随机不确定性和模糊不确定性的问题,因此,进行贮运可靠性研究的关键在于对带有模糊性和不确定性的各类底事件应如何统计评定。模糊故障树分析法将模糊集理论引入故障树分析方法,将底事件(基本事件)发生的概率描述成一模糊数,通过模糊运算规则来估算出整个系统的模糊故障率,从而较成功地解决了这一难题。

## 2 模糊故障树分析方法

故障树分析方法作为一种安全性和可靠性分析的有效方法,在核电站、航天、军工等行业的系统设计、设备维修、日常管理、事故预测等方面已被广泛应用。其方法是:把所关心的事件作为顶事件,逐级分析事故原因(中间)直至底事件,并将各级事件之间的逻辑关系表示成树状机构,形成故障树,再通过定性和定量分析求出事故(顶事件)的发生概率。

### 2.1 模糊数

模糊数  $\tilde{A}$  是论域  $R$  在  $(+\infty, -\infty)$  上的连续模糊子集,设  $L, R$  为模糊数的参照函数,若有

$$u_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L[\frac{m-x}{a}] \cdots \text{当 } x \leq m, a > 0 \\ R[\frac{x-m}{b}] \cdots \text{当 } x > m, b > 0 \end{cases} \quad (1)$$

则模糊数  $\tilde{A}$  为  $L-R$  型模糊数,并记  $\tilde{A} = (m, a, b)_{LR}$ , 其中  $m$  为  $\tilde{A}$  的均值,  $a, b$  分别为  $\tilde{A}$  的置信上、下限。当  $a, b$  分布越大,说明  $\tilde{A}$  越模糊;当  $a, b$  越接近时,说明  $\tilde{A}$  越清晰。

$$\tilde{A} = [m - a + a \cdot I, m + b - b \cdot I] \quad (2)$$

为一区间数,对  $I$  取不同的值,则可得到不同的  $\tilde{A}$  的置信区间。如当  $I$  取 0 时,  $\tilde{A} = [m - a, m + b]$  表明  $\tilde{A}$  最为模糊;当  $I$  取 1 时,  $\tilde{A} = m$  表明  $\tilde{A}$  最清晰。

### 2.2 模糊算子

在进行模糊故障树分析时,可令组成系统的底事件的故障率为模糊数  $\tilde{F}_i$ ,则系统顶事件的故障率  $\tilde{F}_V = \tilde{O}(\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \tilde{F}_3 \cdots \tilde{F}_n)$ ,其中  $\tilde{O}$  为系统的模糊结构函数。

可令:

$$\tilde{F}_1^I = [m_1 - a_1 + a_1 \cdot I, m_1 + b_1 - b_1 \cdot I]$$

$$\tilde{F}_2^I = [m_2 - a_2 + a_2 \cdot I, m_2 + b_2 - b_2 \cdot I]$$

.....

$$\tilde{F}_n^I = [m_n - a_n + a_n \cdot I, m_n + b_n - b_n \cdot I]$$

这样可得到“与门”结构和“或门”结构故障树的模糊算子。

#### (1) 与门结构

根据式(3)和(4)所得到的与门结构和或门结构的模糊算子,则可由故障树的模糊结构函数计算出系统顶事件发生的概率,即系统的不可靠度。

$$\begin{aligned} \tilde{F}_V^{and} &= \prod_{i=1}^n \tilde{F}_i = \tilde{F}_1^I \cdot \tilde{F}_2^I \cdots \tilde{F}_n^I = [m_1 - a_1 + a_1 \cdot I, m_1 + b_1 - b_1 \cdot I] \cdot \\ &[m_2 - a_2 + a_2 \cdot I, m_2 + b_2 - b_2 \cdot I] \cdots [m_n - a_n + a_n \cdot I, m_n + b_n - b_n \cdot I] \\ &= \left[ \prod_{i=1}^n [m_i - a_i + a_i \cdot I], \prod_{i=1}^n [m_i + b_i - b_i \cdot I] \right] \end{aligned} \quad (3)$$

## (2) 或门结构

$$\begin{aligned}\tilde{F}_V^{or} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{F}_i^I) = [1, 1] - \prod_{i=1}^n \{ [1, 1] - [m_i - a_i + a_i \cdot I, m_i + b_i + b_i \cdot I] \} \\ &= \left[ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i - a_i) - a_i \cdot I], 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i + b_i) + b_i \cdot I] \right]\end{aligned}\quad (4)$$

### 3 液体推进剂贮运泄漏的故障树分析与建模

#### 3.1 液体推进剂贮运的泄漏分析

无论是哪种液体推进剂都有腐蚀性较强、易燃易爆、毒性大等特点,但是为了满足导弹部队训练、作战需要,在阵地贮存了相当数量的推进剂,在贮运过程中,由于推进剂的使用、贮存条件、环境等因素发生异变,皆可引起贮运罐泄漏,造成损耗、成分变化甚至变质,加速设备腐蚀并引发环境污染、人身伤害,甚至爆炸等重大事故。

液体推进剂贮罐一般采用铝和铝镁合金及耐酸不锈钢材料制成,在贮运过程中,入孔盖及罐上与各阀、液位计、接管等连接部位的法兰连接处,往往由于连接螺母没有拧紧或四周螺母没有均匀拧紧而产生漏气、漏液现象;聚四氟乙烯密封圈变形引起漏气、漏液;法兰金属密封面受损造成漏气;

焊缝被腐蚀或有缺陷引起漏气、漏液;贮罐上用于充气、取样、测压、排渣等口径较小的管道接头因螺母、螺纹、接头受损产生漏气漏液;罐体由于外界潮湿或受到强大外力冲击(如交通事故、偶然碰撞)受损而出现泄漏;违章操作,操作失误、处置不当等都可能造成大量的泄漏。

#### 3.2 液体推进剂泄漏故障树的建立

故障树是一种演绎分析,用以描述能导致一个过程达到“顶事件”的一种特定危险状态的所有可能故障关系。“顶事件”也是风险评价的目标事件,它可以是一个事故序列,也可以是风险评价中认为重要的任一事故状态。由液体推进剂贮运的泄漏分析可知,推进剂泄漏有五种可能,一是法兰连接不牢,二是焊缝出现问题,三是管道接头处不密封,四是罐体受损,五是意外事故。

液体推进剂泄漏的故障树如图1所示。

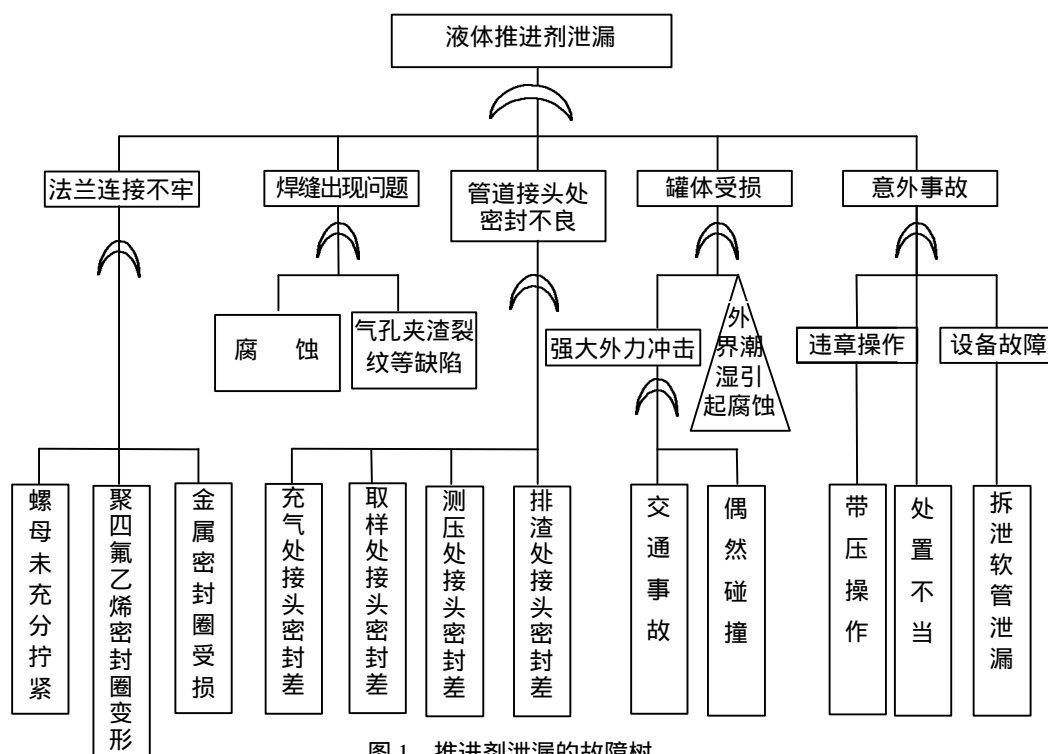


Fig.1 Fault tree of propellant leakage

表 1 基本事件表

Tab.1 Table of basic incidents

符号	基本事件	均值 m 10 <sup>-3</sup>	$\hat{a}, \hat{a}$ 10 <sup>-4</sup>	符号	基本事件	均值 m 10 <sup>-4</sup>	$\hat{a}, \hat{a}$ 10 <sup>-4</sup>
A	螺母未充分拧紧	1	6.776	I	排渣处接头密封不好	2	6.776
B	聚四氟乙烯密封圈变形	5	6.776	J	交通事故	1	11.12
C	金属密封圈变形	6	6.776	K	偶然碰撞	5	6.776
D	焊缝腐蚀	4	3.112	L	外界潮湿引起腐蚀	3	2.78
E	气孔夹渣裂纹等缺陷	1	2.780	M	带压操作	5	6.776
F	充气处接头密封不好	3	6.776	N	拆泄软管泄漏	1	6.776
G	取样处接头密封不好	3	6.776	O	处置不当	1	2.780
H	测压处接头密封不好	2	11.12				

### 3.3 贮运过程中推进剂泄漏的模糊故障树定量分析模型

从本例的故障树中, 可以看出导致液体推进剂发生泄漏的基本事件有 15 个, 由于实验数据和贮运管理工作中所获得的数据有限, 仅得到各基本事件故障率的均值  $m$  和置信上、下限  $\hat{a}$ 、 $\hat{a}$ , 如表 1 所示。

令  $V=\{\text{液体推进剂泄漏}\}$

$P=\{\text{法兰连接不牢}\}$

$Q=\{\text{焊缝出现问题}\}$

$R=\{\text{管道接头处不密封}\}$

$S=\{\text{强大外力冲击}\}$

$T=\{\text{罐体受损}\}$

$U=\{\text{意外事故}\}$

在推进剂泄漏的故障树中, 根据最小割集上行法 (Senanderes 算法), 有:

$P=A \ B \ C$ ,  $Q=D \ E$ ,  $R=F \ G \ H \ I$ ,  
 $S=J \ K$ ,

$T=S \ L$ ,  $U=M \ N \ O$ ,  $V=P \ Q \ R \ T \ U$ 。

假设各基本事件相互独立, 而

$P=A+B+C$ ,  $Q=D+E$ ,  $R=F+G+H+I$ ,  $S=J+K$ ,  
 $T=S+L$ ,  $U=M+N+O$ ,

则顶事件  $V$  的真值函数为:  
 $V=P+Q+R+T+U$ 。

可得到相应顶事件发生的概率的模糊函数为

$$\tilde{F}_V^I = 1 - (1 - \tilde{F}_A^I)(1 - \tilde{F}_B^I)(1 - \tilde{F}_C^I)$$

$$\tilde{F}_Q^I = 1 - (1 - \tilde{F}_D^I)(1 - \tilde{F}_E^I)$$

$$\tilde{F}_R^I = 1 - (1 - \tilde{F}_F^I)(1 - \tilde{F}_G^I)(1 - \tilde{F}_H^I)(1 - \tilde{F}_I^I)$$

$$\tilde{F}_S^I = 1 - (1 - \tilde{F}_J^I)(1 - \tilde{F}_K^I)$$

$$\tilde{F}_T^I = 1 - (1 - \tilde{F}_S^I)(1 - \tilde{F}_L^I)$$

$$\tilde{F}_U^I = 1 - (1 - \tilde{F}_M^I)(1 - \tilde{F}_N^I)(1 - \tilde{F}_O^I)$$

$$\tilde{F}_V^I = 1 - (1 - \tilde{F}_P^I)(1 - \tilde{F}_Q^I)(1 - \tilde{F}_R^I)(1 - \tilde{F}_T^I)(1 - \tilde{F}_U^I)$$

由式  $\tilde{A}_I = [m - a + a \cdot I, m + b - b \cdot I]$ , 对基本事件 A 到 O 作截集可得到下列区间数:

$$\tilde{F}_A^I = [0.001 - 0.0006776 + 0.0006776 I, \\ 0.0016776 - 0.0006776 I]$$

$$\tilde{F}_B^I = [0.005 - 0.0006776 + 0.0006776 I, \\ 0.0056776 - 0.0006776 I]$$

$$\tilde{F}_C^I = [0.006 - 0.0006776 + 0.0006776 I, \\ 0.0066776 - 0.0006776 I]$$

.....

$$\tilde{F}_O^I = [0.001 - 0.0002780 + 0.0002780 I, \\ 0.0012780 - 0.0002780 I]$$

在上两式中, 取 4 位有效数字, 则可得到液体推进剂发生泄漏的各基本事件的概率  $\tilde{F}_V^I$  的  $I$  截集:

$$\tilde{F}_V^I = [0.0041 + 0.0056 I, 0.0153 - 0.0056 I]$$

$F_V^I$  为一区间数对  $I$  取不同的值则可以得到不同

的  $\tilde{F}_V$  的置信区间。表 2 列出了  $I$  从 0 到 1 的取值，间隔为 0.1 时， $\tilde{F}_V$  所对应的不同的置信区间值。

表 2  $\tilde{F}_V$  的置信区间值  
Tab.2 Confidence interval of  $\tilde{F}_V$

$I$	$\tilde{F}_V$ 的上限	$\tilde{F}_V$ 的下限	均值 $m$	置信上限 $a$	置信下限 $b$
0.0	0.0041	0.0153	0.0097	0.0056	0.0056
0.1	0.0047	0.0147	0.0097	0.0050	0.0050
0.2	0.0052	0.0142	0.0097	0.0045	0.0045
0.3	0.0058	0.0136	0.0097	0.0039	0.0039
0.4	0.0063	0.0131	0.0097	0.0034	0.0034
0.5	0.0069	0.0125	0.0097	0.0028	0.0028
0.6	0.0075	0.0119	0.0097	0.0022	0.0022
0.7	0.0080	0.0112	0.0097	0.0017	0.0017
0.8	0.0086	0.0108	0.0097	0.0011	0.0011
0.9	0.0091	0.0103	0.0097	0.0006	0.0006
1.0	0.0097	0.0097	0.0097	0.0000	0.0000

当  $I=1.0$  时， $\tilde{F}_V=0.0097$ ，即在不考虑各基本事件发生的模糊性时，出现泄漏事故的概率为 0.97%，当  $I=0.0$  时，表示在充分考虑了各基本事件的随机不确定性和模糊不确定性因素时，出现泄漏事故的概率在 0.41%至 1.53%之间。当掌握足够的底事件概率数据时运用模糊故障树分析法能够准确估算出底事件的发生率。

4 结束语

应用模糊故障树分析法研究液体推进剂贮运可靠性评估及预测是一种相当有效的方法，与其它方法相比，它具有理论性强、计算速度快、结果可靠等特点。通过快速有效的检测和诊断推进剂贮运的潜在故障，可以对贮运的薄弱环节提前加以控制，及早排除事故隐患。这为推进剂贮运的安全防护、应急处理提供了线索，使工作人员

可以有的放矢地采取相应措施，具有较强的工程应用价值。

参考文献：

[1] 陆雍森. 环境评价[M]. 同济大学出版社, 1999.  
[2] 王煊军. 火箭推进剂安全使用管理理论与实践[M]. 军事科学出版社, 2002.  
[3] 李洪兴. 工程模糊数学方法及应用[M]. 天津科学技术出版社, 1993.  
[4] 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术[M]. 国防工业出版社, 1998.  
[5] 华小洋, 胡宗武, 范祖尧. 模糊故障树分析方法[J]. 机械强度, 1998, (3).

(编辑：王建喜)