

## 【理论与探索】

## 基于模糊事故树的海岛阵地弹药储存失效分析\*

段万寿,刘琼,艾云平

(解放军炮兵学院,合肥 230031)

**摘要:**使用模糊事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法,对海岛阵地弹药储存问题进行了分析;利用求最小割集(Minimum Cutting Sets, MCS)方法找到了造成海岛阵地弹药储存失效的最危险因素;利用三角模糊数对海岛阵地弹药一年储存失效概率进行了理论计算。

**关键词:**海岛阵地弹药;模糊事故树分析;三角模糊数;失效分析

**中图分类号:**X913

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2008)01-0039-03

影响海岛阵地弹药储存失效的环境因素很多,主要有温度、湿度、阳光、海水、盐雾、氧气、雷电等。实践证明,全面对这些环境因素采取防护措施,既不经济也不太可能,必须对这些影响因素有重点、有针对性地进行防护。使用事故树分析方法可以辨识造成海岛阵地弹药储存失效的因素,评价这些因素的危险程度。传统的FTA方法,必须满足基本事件状态为0-1,且下层事件与上层事件存在严格的逻辑关系。但是对海岛阵地环境因素的刻画,不能满足或不能全部满足这2个条件,这在很大程度上限制了FTA的使用范围和精度。本研究首次将模糊FTA的理论用于分析海岛阵地弹药储存失效的自然因素,一方面为海岛阵地弹药防护系统设计提供决策依据,另一方面提出了一种计算弹药非战斗损耗的方法。

## 1 模糊FTA理论

### 1.1 模糊集理论

给定论域 $U$ , $U$ 上的一个模糊子集 $\tilde{A}$ 是指对任意 $u \in U$ ,都有一个隶属程度 $\mu_{\tilde{A}}(u)_0 \leq \mu_{\tilde{A}}(u) \leq 1$ 与之对应。记为:

$$\mu_{\tilde{A}}(u): U \rightarrow [0, 1], u \in U \quad (1)$$

函数 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 称为 $\tilde{A}$ 的隶属函数,模糊子集完全由其所规定。当 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 退化为 $[0, 1]$ 时,它是一个普通的子集。所以普通集合是模糊集合的特殊情形。

### 1.2 模糊事故树算法

由于一个事故树最终可以只包含与门和或门,所以这里只讨论与门模糊算子和或门模糊算子(其他逻辑门可以化为与门、或门)。传统的事故树分析所用的与门和或门算子为:

$$q_{\text{AND}} = \prod_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

$$q_{\text{OR}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (3)$$

其中 $q_i$ 是事件 $i$ 发生的概率,是精确值。根据模糊数学的多元扩张原理,可得与门和或门算子为:

$$\tilde{q}_{\text{AND}} = \prod_{i=1}^n \tilde{q}_i = \tilde{q}_1 \otimes \tilde{q}_2 \otimes \cdots \otimes \tilde{q}_n = \left( \prod_{i=1}^n a_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n b_i \right) \quad (4)$$

$$\tilde{q}_{\text{OR}} = \left\{ \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i) \right], \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i) \right], \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - b_i) \right] \right\} \quad (5)$$

\* 收稿日期:2007-12-30

作者简介:段万寿(1982—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要从事兵器与弹药防护研究。

## 2 三角模糊数

### 2.1 三角模糊数的性质

在很多情况下,对 FTA 基本事件发生概率的描述是不精确的,使用的模糊数大致可以分为 4 类:正态模糊数、LR 型模糊数、梯形模糊数和三角模糊数. 因为三角模糊数具有通用性强、方便计算等特点,所以我们将其他 3 类模糊数都转化为三角模糊数. 另外,还有一些基本事件的发生有精确统计的数据,还有一些基本事件的概率是由语言值描述的,这里我们统一转化为三角模糊数处理.

$R$  上的一个模糊集  $\tilde{A}$  称为三角模糊数,若它满足:

- 1) 存在  $R$  上的 3 个点  $a, m, b$ , 且  $a < m < b$ ;
- 2) 隶属函数满足下列条件:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{(x-a)}{(m-a)}, & a \leq x \leq m \\ \frac{(b-x)}{(b-m)}, & m \leq x \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

隶属函数如图 1 所示.

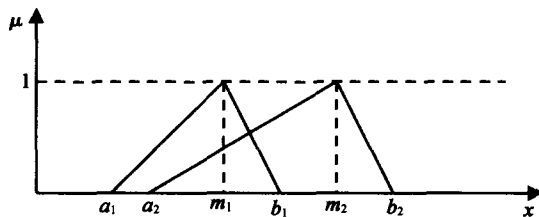


图 1 三角模糊隶属函数

下面给出连续型隶属函数的模糊数的代数运算公式. 由式(2)可知,三角模糊数可由 3 个参数  $a, m, b$  表示, 记为  $\tilde{p} = (a, m, b)$ . 令模糊数  $\tilde{p}_1 = (a_1, m_1, b_1)$ ,  $\tilde{p}_2 = (a_2, m_2, b_2)$ , 则模糊加法、模糊减法及模糊乘法可分别定义如下:

$$\tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 = (a_1 + a_2, m_1 + m_2, b_1 + b_2) \quad (7)$$

$$\tilde{p}_1 \odot \tilde{p}_2 = (a_1 \cdot a_2, m_1 \cdot m_2, b_1 \cdot b_2) \quad (8)$$

### 2.2 模糊树的归一化

1) 精确概率值. 对于精确概率值  $p$ , 转化成三角模糊数为:

$$\tilde{q} = (p, p, p).$$

2) 其他形式的非三角模糊数. 对于其他形式的非三角模糊数, 如正态模糊数、LR 型模糊数、梯形模糊数等. 首先, 求出相应隶属函数的重心作为  $m$ , 再将其变为三角模糊数  $(a, m, b)$ . 根据文献[1] 中的方法,  $a, m, b$  的关系如式(9) 所示:

$$m - a = b - m = 0.0556m \quad (9)$$

正态模糊数和 LR 型模糊数的重心是它们的中值. 梯形模糊数  $(a, b, c, d)$  的重心  $x$  为:

$$x = \frac{c^2 + d^2 - a^2 - b^2 - ab + cd}{3(c - b + d - a)} \quad (10)$$

3) 语言值. 当语言值转化为三角模糊数时, 要先知道语言值所对应概率的大致量级. 对于不同行业、不同部门及不同环节, 人们对同一概率给予的语言评价是不同的. 这里采用美国杜邦公司的“故障概率语言评价标准”(见表 1). 知道语言值所对应概率的大致量级后, 将这一量级作为相应语言值的  $m$ , 再将其转化为三角模糊数  $(a, m, b)$ ,  $a, m, b$  的关系仍如式(9) 所示.

表 1 美国杜邦公司故障概率语言评价标准

语言评价	发生概率	语言评价	发生概率
非常容易发生	$10^{-1}$	不常发生	$10^{-4}$
容易发生	$10^{-2}$	几乎不发生	$10^{-5}$
偶尔发生	$10^{-3}$	很难发生	$10^{-6}$

## 3 模糊 FTA 分析

### 3.1 建立事故树

以我国东南沿海海岛自然气候为背景, 假定弹药储存未采取任何防护措施, 建立海岛阵地弹药储存失效事故树. 首先, 根据材料将弹药零部件分为 4 类: 金属元件、装药、非金属材料 and 电子元器件. 金属锈蚀可以分为电化学腐蚀、化学腐蚀和物理腐蚀. 根据我国东南沿海气候特点和弹药的结构特点, 只考虑前 2 种腐蚀形式. 其中电化学腐蚀机理, 无论是大电池锈蚀过程还是微电池锈蚀过程都离不开氧气、水和电解质的共同作用. 装药失效主要是由于温湿度的共同作用引起的. 虽然湿度过低或温度过低也可能导致装药失效, 但结合我国东南沿海气候特点, 我们只考虑

温湿度过高的情况.造成非金属老化的因素非常多,有盐雾老化、光照老化和温湿度老化等.由于阳光和水的存在可以大大加速非金属材料的光照老化,所以本研究将这2个事件催化条件和阳光联合作用作为导致海岛阵地弹药非金属材料光照老化的原因.电子元器件的失效不仅与电磁环境的危害有关,还与空气湿度有关.我国东南沿海常年湿度都在70%以上,在这样高的湿度下,电子元器件容易生锈、长霉造成管脚短路或电路短路.在电磁环境因素中,没有考虑静电放电,因为海岛湿度都比较大,静电电荷难以积累,反而雷暴天气比较频繁,需要重点考虑.根据这些材料的失效机理和失效模式,作出FTA简图,如图2所示,基本事件名称及发生概率等如表2所示.

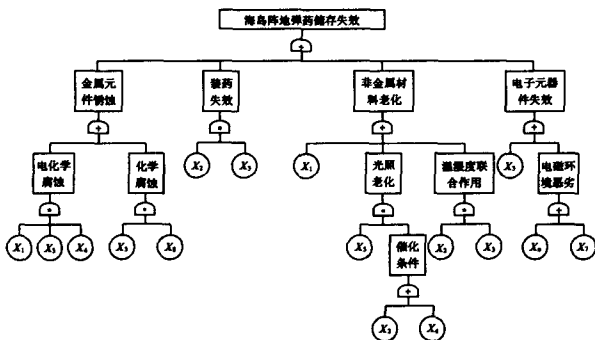


图2 海岛阵地弹药储存失效事故树

### 3.2 定性分析

根据图2的事故树进一步简化得到顶事件的布尔表达式为:

$$T = (X_1 X_3 X_4 + X_3 X_8) + (X_2 X_3) + [X_1 + X_5(X_2 + X_4) + (X_2 X_3)] + [X_3 + (X_6 + X_7)]$$

化简得:

$$T = X_1 + X_3 + X_2 X_3 + X_4 X_5 + X_6 + X_7$$

因此,事故树的最小割集为  $\{X_1\}$ ,  $\{X_3\}$ ,  $\{X_2, X_3\}$ ,  $\{X_4, X_5\}$ ,  $\{X_6\}$ ,  $\{X_7\}$ . 其中,单因素的最小割集为  $\{X_1\}$ ,  $\{X_3\}$ ,  $\{X_6\}$ ,  $\{X_7\}$ . 由此可知“盐雾天气”、“相对湿度大于70%”、“雷电”和“强射频信号”是造成海岛阵地弹药储存失效的最危险因素.

### 3.3 定量分析

根据参考文献[5-6]中提供的资料,以我国东南沿海气候为背景,总结一年内各基本事件发生的概率如表2所示.同时根据式(9)~(10)得到它们的归一化结果.

根据式(4),(5),(7),(8),结合事故树,可以计算出一年内海岛阵地弹药储存失效的模糊概率为:

$$\tilde{q}_T = (0.975, 0.978, 0.981)$$

资料显示,在不采取任何防护措施的情况下,我国东南沿海某海岛阵地弹药一年储存失效率高达92%.这与上述理论计算结果很接近.

表2 基本事件及其发生概率

基本事件	名称	发生概率	归一化结果
$X_1$	盐雾天气	$(0.1, 0.2, 0.9, 1)$ (梯形模糊数)	$(0.52, 0.55, 0.58)$
$X_2$	温度大于30℃	$(0.33)$ (正态模糊数)	$(0.31, 0.33, 0.35)$
$X_3$	相对湿度RH大于70%	0.9	$(0.9, 0.9, 0.9)$
$X_4$	氧气	1	$(1, 1, 1)$
$X_5$	阳光	$(0.3, 0.4, 0.5, 0.6)$ (梯形模糊数)	$(0.42, 0.45, 0.48)$
$X_6$	雷电	$(0.25, 0.30)$ (LR模糊数)	$(0.26, 0.28, 0.3)$
$X_7$	强射频信号	偶尔发生	$(10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-3})$
$X_8$	空气中酸性氧化物含量较大	偶尔发生	$(10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-3})$

## 4 结束语

1) “盐雾天气”、“相对湿度大于70%”、“雷电”和“强射频信号”是造成海岛阵地弹药储存失效的最危险因素.因为盐雾天气通常湿度也比较大,所以海岛阵地弹药防护的重点应当是“吸湿控温、严防电磁危害”.

2) 模糊FTA方法可以较好地利用造成海岛阵地弹药储存失效的各种自然因素的发生概率,预测其失效概率,为计算野战弹药非战斗损耗提供一个较好的解决方法.

3) 本研究的模糊FTA方法计算,没有引入模糊逻辑门的概念,这是理论计算(下转第52页)

$$A' = \frac{MTBF'}{MTBF' + MTTR'} = \frac{20}{20 + 1.5} = \frac{40}{43};$$

$$K'_2 = \frac{A'}{A} \cdot K_2 = 0.62.$$

$$\text{则 } \overline{C'_{DX}} = \frac{\overline{C'_{ZX}}}{0.62} = \frac{3\,350}{0.62} = 5\,403.226 \text{ 万.}$$

综合现役型号地空导弹装备的使用保障费用各个费用项目和2个型号武器系统的差异,得到该新型号地空导弹装备的使用保障费用为

$$C'_{OM} = 13\,717.2 \text{ 万};$$

$$C'_S = C_S + 2 \times 3 \times (200 - 150) = 10\,212.4 \text{ 万};$$

$$C'_P = C_P = 4\,172.9 \text{ 万.}$$

该新型号地空导弹装备使用保障费用服役15年的费用估算值

$$C'_{OS} = C'_{OM} + C'_S + C'_P = 28\,102.5 \text{ 万.}$$

本研究通过对地空导弹装备使用保障工作特性进行分析,确定了使用保障费用的组成,构建了费用估算模型.建立的使用保障费用模型和费用估算模型对研究地空导弹装备使用保障费用有所帮助.地空导弹装备使用保障费用的研究是一个复杂的系统工程,本研究只是探讨性的,并且做了大量的简化.地空导弹装备采购部门和工业研制部门应高度重视这一问题,逐步建立一

套完善的LCC估算模型和保障费用估算、支付审核机制,以提高经费使用的效益,提高装备的战斗力的.

## 参考文献:

- [1] 郭继周,宋贵宝,彭绍雄.装备使用保障费用灰色建模分析[J].系统工程与电子技术,2004,26(1):64-67.
- [2] 王汉功,甘茂治.装备全系统全寿命管理[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [3] 华兴来,刘庆华.装备管理工程[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [4] 甘茂治,康建设,高崎.军用装备维修工程学[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [5] 汪应洛.系统工程理论、方法与应用[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [6] 狄晓华,杜晓明,朱宁.保障性分析在寿命周期费用估算中的应用[J].兵工自动化,2007,26(5):38-39.
- [7] 袁俊.军用飞机使用保障费用估算[J].航空科学技术,2006,21(4):10-12.
- [8] 赵英俊.导弹武器装备使用保障费用分析[J].飞航导弹,2001,14(3):35-38.

(上接第41页)与实际误差的来源之一.今后的研究方向应当引入这一概念,以提高计算精度,扩大模糊FTA的应用范围.

## 参考文献:

- [1] 安振涛.军械储存与环境控制[M].北京:兵器工业出版社,1998.
- [2] 张景林,崔国璋.安全系统工程[M].北京:煤炭工业出版社,2002.
- [3] 史定华,王松瑞.故障树分析技术方法和理论[M].

北京:北京师范大学出版社,1993:245-249.

- [4] 李青,陆廷金,李宁萍,等.三角模糊数的模糊故障树分析及其应用[J].中国矿业大学学报,2000,29(1):56-59.
- [5] 侯福均,肖贵平,杨世平.模糊事故树分析及其应用研究[J].河北师范大学学报,2001,25(4):464-467.
- [6] 李良春,王红卫,谭志强.影响海岛部队弹药储存可靠性的诱因[J].包装工程,2002,23(6):68-69.
- [7] 中科院.中国自然地理:气候[M].北京:科学出版社,1984:90-97.