

# 基于 $L-R$ 型模糊数的原棉库火灾事故树分析

郑艳敏, 张金锋, 刘庆洲

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄 050018)

**摘要:**根据现场实际状况的统计并依据专家经验所提供的模糊信息,在对原棉库发生火灾事故构建事故树的基础上,通过运用系统工程的模糊事故树理论中的尖型隶属函数,对原棉库火灾事故进行了模糊可靠性分析,得出了其发生事故的模糊概率可能性分布;并对各个基本事件的结构重要度进行了分析,确立了影响系统的最主要因素,为预防火灾事故的发生以及对系统进行安全分析提供了新的方法和途径。

**关键词:**事故树;火灾事故;模糊概率;模糊算子

中图分类号:X932 文献标志码:A

## Fault tree analysis of fire accident in cotton plant based on $L-R$ fuzzy numerals

ZHENG Yan-min, ZHANG Jin-feng, LIU Qing-zhou

(College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:**Based on the statistics of running condition of field equipment and the fuzzy information provided by experts, the fault tree of fire accident in cotton plant is constructed. A reliability analysis on fire accident is made by using sharp-state-typed membership function of the fuzzy fault tree theory, then the fuzzy probability distribution of the explosion is gained. The structural importance of each basic event is also analyzed, and the most influencing factors are determined. It provides a new way for safety analysis of the system and prevention of fire accidents.

**Key words:**fault tree; fire accident; fuzzy probability; fuzzy operator

随着生产技术和生产规模的扩大,纺织企业的生产安全已成为一个社会问题。棉纺织生产工艺流程长、工序多、机械设备复杂、数量大、机器排列密集、通道窄小、机器设备转速快;生产的原料主要是棉、麻和化纤等易燃、可燃物,因此火灾危险性较大,火灾发生率高。一旦发生火灾,蔓延途径多,极易发生大面积立体火灾;火灾事故的危害巨大、后果严重,轻则烧毁原料、产品,重则彻底毁坏机器设备或造成人员伤亡。

在对大型复杂系统进行事故概率分析时,事故树各底事件发生的概率本身带有一定的不确定性,即模糊性<sup>[1]</sup>,因此把模糊集理论引入到事故树分析中,用模糊数描述事件发生的概率,具有较大的灵活性和适应性。在模糊数学理论中,对于那些故障发生概率低、得不到发生概率精确值的基本事件,可以认为其发生概率是模糊数。采用模糊概率方法,并结合工程技术人员的实际经验和判断来构造模糊数的隶属函数,可使评价结果更趋合理和科学<sup>[2-3]</sup>。因此本文将采用模糊事故树分析法来分析原棉库火灾事故发生的概率。

收稿日期:2012-02-20;修回日期:2012-03-23;责任编辑:王海云

作者简介:郑艳敏(1984-),女,河南商丘人,硕士,主要从事火灾防治理论与技术方面的研究。

# 1 事故树分析

## 1.1 模糊理论基础

模糊数  $\mu_\omega(x)$  有 2 种定义方法, 一般采用的方法为设  $L, R$  为模糊数的参照函数, 若有:

$$\mu_\omega(x) = \begin{cases} L[(m-x)/\alpha], & x \leq m, \alpha > 0, \\ R[(x-m)/\beta], & x > m, \beta > 0, \end{cases}$$

则称模糊数  $\mu_\omega(x)$  为  $L-R$  型模糊数, 并记  $\mu_\omega(x)(m, \alpha, \beta)_{LR}$ , 其中  $m$  为  $\mu_\omega(x)$  的均值,  $\alpha, \beta$  分别称为  $\mu_\omega(x)$  的左右分布。当  $\alpha, \beta$  等于 0 时,  $\mu_\omega(x)$  不是模糊数。 $\alpha, \beta$  分布越是广泛, 其  $\mu_\omega(x)$  越模糊<sup>[4]</sup>。参照函数有多种形式, 故  $L-R$  型模糊数的隶属函数也有多种形式<sup>[5]</sup>, 常见的有三角形、正态型和尖型。一般常用的是尖型函数, 其表达式为

$$\mu_\omega(x) = \begin{cases} L[(m-x)/\alpha] = \frac{1}{[1+(m-x)/\alpha]}, & x \leq m, \alpha > 0, \\ R[(x-m)/\beta] = \frac{1}{[1+(x-m)/\beta]}, & x > m, \beta > 0. \end{cases} \quad (1)$$

一般计算模糊数时有加、减、乘、除 4 种法则, 本文用到减法和乘法法则, 其中减法法则用在计算或门模糊算子中, 而乘法法则用在计算与门模糊算子中。

其减法运算法则为  $(m, \alpha, \beta)_{LR} - (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m-n, \alpha+\delta, \beta+\gamma)$ ;

乘法运算法则为  $(m, \alpha, \beta)_{LR} \times (n, \gamma, \delta)_{LR} = (mn, m\gamma+n\alpha, m\delta+n\beta)_{LR}, (m > 0, n > 0)$ 。

## 1.2 事故树分析与门模糊算子

对于与门, 其模糊算子的递推形式为<sup>[5-6]</sup>

$$P_r^{AND} = (m_r, \alpha_r, \beta_r)_{LR} = (m_{p1}, \alpha_{p1}, \beta_{p1})_{LR} \otimes (m_{p2}, \alpha_{p2}, \beta_{p2})_{LR} \otimes \dots \otimes (m_{pn}, \alpha_{pn}, \beta_{pn})_{LR} = (m_{r,i-1} m_{pi}, m_{r,i-1} \alpha_{pi} + m_{pi} \alpha_{r,i-1}, m_{r,i-1} \beta_{pi} + m_{pi} \beta_{r,i-1})_{LR}^{i=1 \dots n} \quad (2)$$

其中  $m_r$  是专家经验得出的顶事件发生概率的均值;  $m_{p1}, m_{p2}, \dots, m_{pn}$  分别指专家对导致顶事件发生的每个基本事件的发生概率;  $\alpha$  和  $\beta$  是发生概率均值的左右分布。

式中  $m_{ri}, \alpha_{ri}, \beta_{ri} (i=0, 1, 2, \dots, n)$  分别表示下列递推项:

$$\begin{aligned} m_{r0} &\cong m_{p1}, m_{r1} = m_{p1} m_{p2}, m_{r2} = m_{r1} m_{p3}, \dots, m_{ri} = m_{r,i-1} m_{p,i+1}; \\ \alpha_{r0} &\cong \alpha_{p1}, \alpha_{r1} = m_{p1} \alpha_{p2} + m_{p2} \alpha_{p1}, \alpha_{r2} = m_{r1} \alpha_{p3} + m_{r1} \alpha_{r1}, \dots, \alpha_{ri} = m_{r,i-1} \alpha_{p,i+1} + m_{p,i+1} \alpha_{r,i-1}; \\ \beta_{r0} &\cong \beta_{p1}, \beta_{r1} = m_{p1} \beta_{p2} + m_{p2} \beta_{p1}, \beta_{r2} = m_{r1} \beta_{p3} + m_{p3} \beta_{r1}, \dots, \beta_{ri} = m_{r,i-1} \beta_{p,i+1} + m_{p,i+1} \beta_{r,i-1}. \end{aligned}$$

事故树或门模糊因子的递推形式为

$$P_r^{OR} = (m_r, \alpha_r, \beta_r)_{LR} = (1, 0, 0)_{LR} - [m_{r,i-1} (1-m_{pi}), m_{r,i-1} \alpha_{pi} + (1-m_{pi}) \alpha_{r,i-1}, m_{r,i-1} \beta_{pi} + (1-m_{pi}) \beta_{r,i-1}]_{LR}^{i=1 \dots n} \quad (3)$$

式中  $m_{ri}, \alpha_{ri}, \beta_{ri} (i=0, 1, 2, \dots, n)$  分别表示下列递推项:

$$\begin{aligned} m_{r0} &\cong m_{p1}, m_{r1} = (1-m_{p1})(1-m_{p2}), m_{r2} = m_{r1}(1-m_{p3}), \dots, m_{ri} = m_{r,i-1}(1-m_{p,i+1}); \\ \alpha_{r0} &\cong \alpha_{p1}, \alpha_{r1} = (1-m_{p1})\alpha_{p2} + (1-m_{p2})\alpha_{p1}, \alpha_{r2} = m_{r1}\alpha_{p3} + (1-m_{p3})\alpha_{r1}, \dots, \alpha_{ri} = m_{r,i-1}\alpha_{p,i+1} + (1-m_{p,i+1})\alpha_{r,i-1}; \\ \beta_{r0} &\cong \beta_{p1}, \beta_{r1} = (1-m_{p1})\beta_{p2} + (1-m_{p2})\beta_{p1}, \beta_{r2} = m_{r1}\beta_{p3} + (1-m_{p3})\beta_{r1}, \dots, \beta_{ri} = m_{r,i-1}\beta_{p,i+1} + (1-m_{p,i+1})\beta_{r,i-1}. \end{aligned}$$

## 2 实例应用

### 2.1 原棉库事故树的构建

棉花非常容易燃烧, 原棉库的储量又比较大, 棉花发生自燃以及受引火源的影响而发生火灾的危险性非常大。为此采用事故树分析的方法进行研究, 找出可能导致火灾事故发生的影响因素, 并对各因素间的逻辑关系作出描述, 据此得出事故树图(如图 1 所示)。

### 2.2 顶事件模糊概率可能性分布

因为如图 1 所示的事故树的“或门”比“与门”多, 所以其最小径集的数量比最小割集的数量要少, 从最小径集下手分析比较方便。从事务树中可以求得最小径集如下:

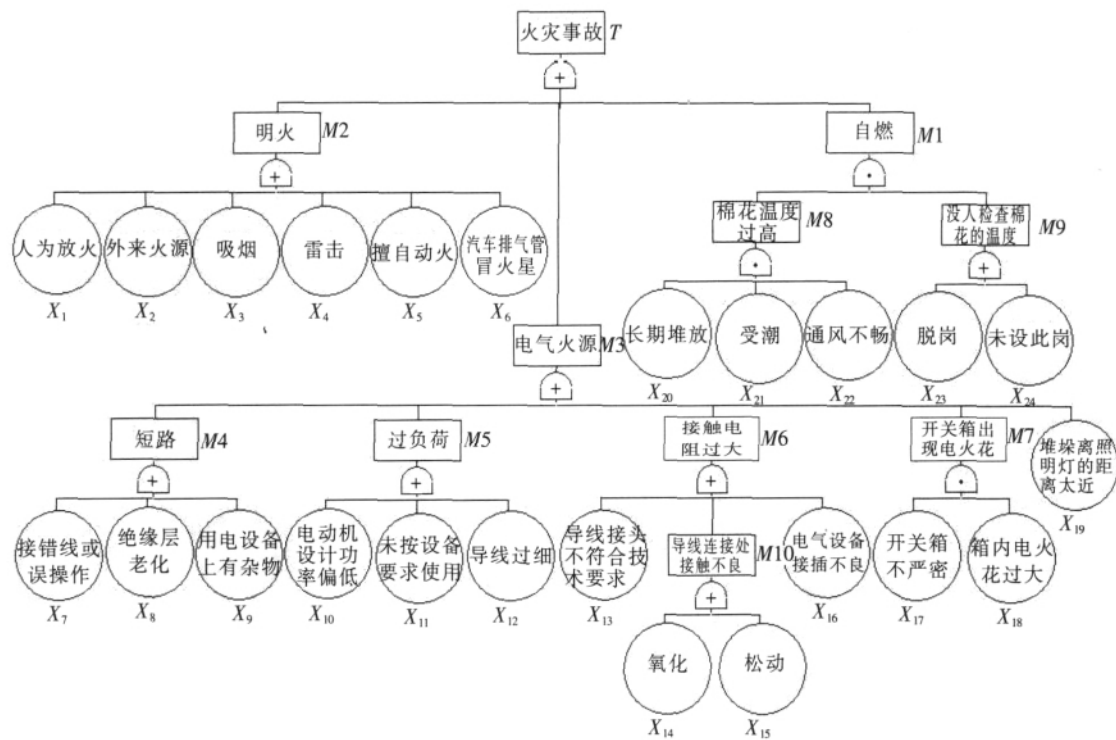


图 1 原棉库火灾事故的事故树

Fig.1 Fault tree of raw cotton plant fire

$P_1 = \{X_1 \sim X_{17}, X_{19}, X_{20}\}, P_2 = \{X_1 \sim X_{17}, X_{19}, X_{21}\}, P_3 = \{X_1 \sim X_{17}, X_{19}, X_{22}\}, P_4 = \{X_1 \sim X_{17}, X_{19}, X_{23}, X_{24}\}, P_5 = \{X_1 \sim X_{16}, X_{18}, X_{19}, X_{20}\}, P_6 = \{X_1 \sim X_{16}, X_{18}, X_{19}, X_{21}\}, P_7 = \{X_1 \sim X_{16}, X_{18}, X_{19}, X_{22}\}, P_8 = \{X_1 \sim X_{16}, X_{18}, X_{19}, X_{23}, X_{24}\}。$

那么事故树顶事件  $T$  的结构函数为  $T = ABCDEFGHO$ , 其模糊算子为

$P_A = OR \{P_1 \sim P_{17}, P_{19}, P_{20}\}, P_B = OR \{P_1 \sim P_{17}, P_{19}, P_{21}\}, P_C = OR \{P_1 \sim P_{17}, P_{19}, P_{22}\}, P_D = OR \{P_1 \sim P_{17}, P_{19}, P_{23}, P_{24}\}, P_E = OR \{P_1 \sim P_{16}, P_{18}, P_{19}, P_{20}\}, P_F = OR \{P_1 \sim P_{16}, P_{18}, P_{19}, P_{21}\}, P_G = OR \{P_1 \sim P_{16}, P_{18}, P_{19}, P_{22}\}, P_H = OR \{P_1 \sim P_{16}, P_{18}, P_{19}, P_{23}, P_{24}\}, P_O = AND \{P_A, P_B, P_C, P_D, P_E, P_F, P_G, P_H\}。$

根据现场实际状况的统计以及专家经验得出事件发生概率的均值  $m_i$  如表 1 所示(均值的依据), 又由式(1)得知隶属函数是对称的, 那么取均值在中间的点  $x$  的隶属度为 0.1, 那么此时求得  $\alpha_i = \beta_i = 0.05 m_i$ , 其  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  的值如表 1 所示。

根据表 1、图 1 及式(2)、式(3)计算, 由事故树的结构函数计算得出顶事件的概率如下:  $P_T = (0.0256, 0.0068, 0.0068)_{LR} = (0.0181, 0.0310)$ , 由此可知, 顶事件发生概率大约是 0.0256, 系统的可靠度约为 0.9744, 顶事件的发生概率在(0.0181, 0.0256)之间。从事故树的基本事件以及顶事件的发生概率中可以看出发生火灾的危险性较大。因此从最小径集中找出基本事件影响顶事件发生的重要程度。

### 2.3 结构重要度分析

结构重要度分析是从事故树结构上分析各基本事件的重要程度。即在不考虑各基本事件的发生概率的情况下, 分析各基本事件对顶事件发生所产生的影响程度。基本事件结构重要度越大, 它对顶事件的影响就越大, 反之亦然。利用最小径集近似判别公式为  $I(i) = \sum_{X_j \in E_i} 1/2^{n_i-1}$ , 其中  $I(i)$  为基本事件  $x_i$  的结构重要系数的近似判别值;  $n_i$  为基本事件  $x_i$  所属最小径集包含的基本事件数。为了计算方便, 令  $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = 1$ , 且最小割集中每个基本事件都得相同的一份。则:  $X_1 = 1/20 + 1/20 + 1/20 + 1/21 + 1/20 + 1/20 + 1/20 + 1/21 = X_3 = \dots = X_{16} = X_{19}$ ;

$$X_{17} = 1/20 + 1/20 + 1/20 + 1/21 = X_{18}; X_{20} = 1/20 + 1/20 = X_{21} = X_{22}; X_{23} = 1/21 + 1/21 = X_{24}。$$

表1 原棉车间火灾事故树基本事件的故障概率均值及左右分布

Tab. 1 Failure probability and distribution of the basic event in the raw cotton plant fire fault tree

代号	基本事件	均值 $m_i$	分布 $\alpha_i$ 和 $\beta_i (\times 10^{-3})$	代号	基本事件	均值 $m_i$	分布 $\alpha_i$ 和 $\beta_i (\times 10^{-3})$
$X_1$	人为放火	0.1	5.5	$X_{13}$	导线接头不符合技术要求	0.08	3.87
$X_2$	外来火源	0.06	3.34	$X_{14}$	氧化	0.03	2.11
$X_3$	吸烟	0.06	3.34	$X_{15}$	松动	0.03	2.11
$X_4$	雷击	0.004	0.23	$X_{16}$	电气设备接插不良	0.07	3.57
$X_5$	擅自动火	0.05	2.78	$X_{17}$	开关箱不严密	0.005	0.28
$X_6$	汽车排气管冒火星	0.09	4.31	$X_{18}$	箱内电火花过大	0.09	4.31
$X_7$	接错线或误操作	0.06	3.34	$X_{19}$	堆垛离照明灯的距离太近	0.06	3.34
$X_8$	绝缘层老化	0.05	2.78	$X_{20}$	长期堆放	0.05	2.78
$X_9$	用电设备上有杂物	0.04	2.33	$X_{21}$	受潮	0.04	2.33
$X_{10}$	电动机设计功率偏低	0.08	3.87	$X_{22}$	通风不畅	0.07	3.89
$X_{11}$	未按设备要求使用	0.2	1.12	$X_{23}$	脱岗	0.003	0.18
$X_{12}$	导线过细	0.07	3.89	$X_{24}$	未设此岗	0.001	0.11

所以,结构重要度顺序为  $I_{\varphi}(1)=I_{\varphi}(2)=I_{\varphi}(3)=I_{\varphi}(4)=I_{\varphi}(5)=I_{\varphi}(6)=I_{\varphi}(7)=I_{\varphi}(8)=I_{\varphi}(9)=I_{\varphi}(10)=I_{\varphi}(11)=I_{\varphi}(12)=I_{\varphi}(13)=I_{\varphi}(14)=I_{\varphi}(15)=I_{\varphi}(16)>I_{\varphi}(17)=I_{\varphi}(18)>I_{\varphi}(20)=I_{\varphi}(21)=I_{\varphi}(22)>I_{\varphi}(23)=I_{\varphi}(24)$ 。

通过以上的理论分析可知,基本事件“人为放火、外来火源、吸烟、雷击、擅自动火、汽车排气管冒火星、接错线或误操作、绝缘层老化、用电设备上有杂物、电动机设计功率偏低、未按设备要求使用、导线过细、导线接头不符合技术要求、氧化、松动、电气设备接插不良、堆垛离照明灯的距离太近”发生与否对整个系统危险性大小的影响是比较大的,是防治对策的主要研究对象。

### 3 结 论

1) 基于模糊数学理论的尖型隶属函数,解决了以往事故树无法解决的基本事件发生概率值的问题,对原棉库事故进行分析,使得事故树分析的范围得以延伸和扩展,这将为杜绝纺织企业火灾事故的发生、保证安全生产、降低灾害损失具有重要的理论意义和实际应用价值。

2) 通过对基本事件结构重要度的分析,确定了影响事故树顶事件发生的主要原因,使系统安全分析更加全面,并为其提供了新的方法和途径;确立了系统最薄弱的环节,为制定纺织企业火灾事故的风险控制措施提供了理论支撑。

### 参考文献:

- [1] 周晓蔚,王丽萍,郑丙辉. 基于三角模糊数的沉积物污染生态风险评价[J]. 环境科学 (Environmental Science), 2008, 29(11): 3 206-3 212.
- [2] 周长春. 连续危险源危险性评价原理与方法及其在煤矿瓦斯灾害中的应用研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 1995.
- [3] 韩 达. 化工企业开展危害识别及风险评估的现状与对策[J]. 化工进展 (Chemical Industry and Engineering Progress), 2003, 22(7): 766-795.
- [4] 黄洪钟. 机械系统故障树分析的一种新的模糊方法[J]. 机械科学与技术 (Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering), 1994(1): 1-7.
- [5] 李 兵,朱梅林,陈晓伟,等. 模糊故障树分析法在内燃机可靠性中的应用研究[J]. 内燃机学报 (Transactions of CSICE), 1999, 17(1): 63-66.
- [6] 肖 丹,秦文贵,邱志强. 模糊故障树分析法及其在矿井水灾评价中的应用[J]. 矿业安全与环保 (Mining Safety & Environmental Protection), 2006, 33(5): 43-50.