

文章编号: 1001- 2486(2009) 06- 0126- 06

# 模糊故障树分析方法在机场环境安全中的应用\*

朱云斌<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>, 常 青<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京师范大学 生命科学学院, 江苏 南京 210046)

**摘要:**采用故障树分析法,对引起鸟击飞机的各个因素进行系统分析,并建立了故障树。通过定性分析,可得引起顶事件发生的 2580 个最小割集。采用专家判断和模糊集理论相结合的方法,评估故障树底事件发生概率的模糊性,并以“垃圾堆对鸟的吸引”这一底事件为例,计算出其模糊失效率。通过定量分析,计算出顶事件的发生概率为 0.00241,同时可计算各底事件的重要度。

**关键词:**机场环境安全; 鸟击飞机; 故障树分析; 专家判断; 模糊集

**中图分类号:** V328.1; TP391 **文献标识码:** A

## Application of the Fuzzy Fault Tree Analysis Method to Airport Environment Security

ZHU Yun-bin<sup>1</sup>, HUANG Xiao-ming<sup>1</sup>, CHANG Qing<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** By means of fault tree analysis method, this paper gives a systemic analysis of the relevant factors which cause the fault of bird strike aircraft, and its fault tree is also established. Through qualitative analysis, 2580 minimum cut sets can be obtained. Expert estimation method, combined with fuzzy sets theory, is adopted to assess the happening probability of the base events. The calculating of “waste landfill attracting bird” — one of the base events of bird-strike-aircraft, is given as an example of this method. Through quantitative analysis, the happening probability of the top event is 0.00241, and the importance degree of all base events can be analyzed.

**Key words:** airport environment security; bird strike aircraft; fault tree analysis; expert estimation; fuzzy set

故障树分析法(FAT)<sup>[1]</sup>是一种演绎方法,它把系统不希望发生的事件作为故障树的顶事件,用规定的逻辑符号自上而下地分析导致顶事件发生的所有可能的直接原因,以及相互的逻辑关系,并由此逐步深入分析,直至找到基本原因即故障树的底事件为止<sup>[2]</sup>。在传统的 FAT 中,底事件的发生概率常常被认为是精确值<sup>[3]</sup>,但是对类似鸟击飞机等低概率重大灾难性机场环境安全事件而言,由于缺乏统计数据或受各种因素的影响,无法确定底事件的精确概率。本文运用专家判断和模糊集理论相结合的方法,分析和计算引起鸟击飞机的各底事件和顶事件发生的概率,以及各底事件的重要度,并进一步判别安全隐患的优先次序。

## 1 故障树的建立与定性分析

### 1.1 故障树建立

根据故障树顶事件确定的原则,将“鸟击飞机”作为故障树的顶事件,其最直接原因是飞机飞行活动状态、鸟类活动等共同作用的结果,而以这两个事件作为次顶事件,采用类似方法继续深入,层层分析下去,直至分解到各类底事件为止,如图 1 所示。经过分析,共有 59 个基本事件。各事件如表 1 所列。

\* 收稿日期: 2009- 09- 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30770315)

作者简介: 朱云斌(1966—),男,博士生。

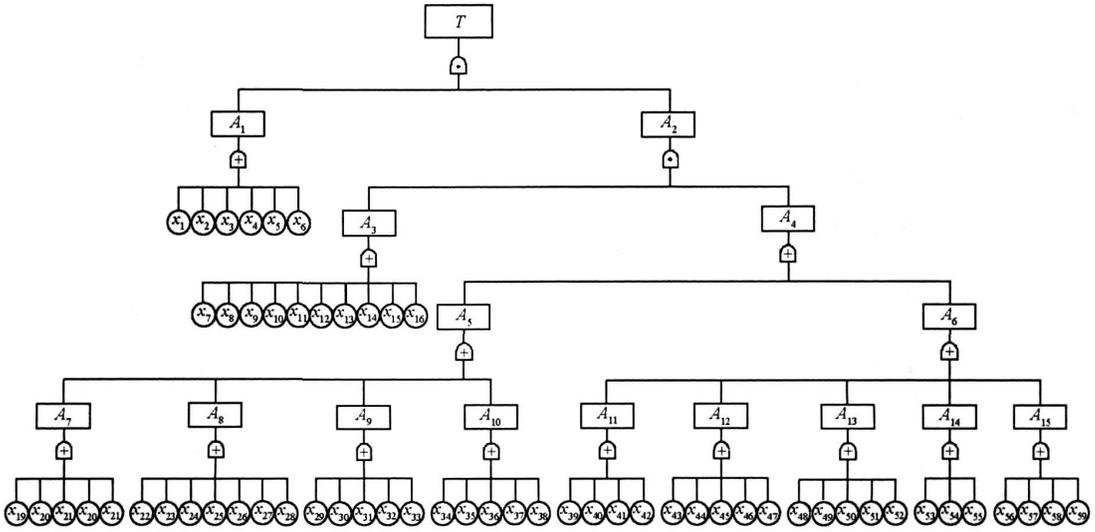


图 1 鸟击飞机故障树

Fig. 1 FTA for bird strike aircraft

表 1 各事件对应的代码符号

Tab.1 Symbol for events

代码	事件名称	代码	事件名称	代码	事件名称
$T$	鸟击飞机	$X_{10}$	重量 1~ 1.8kg 的个鸟撞飞机	$X_{35}$	植被或土壤中孵化的昆虫对鸟的吸引
$A_1$	飞机活动状态	$X_{11}$	重量 0.3~ 1kg 的群鸟撞飞机	$X_{36}$	产种子的植被对鸟的吸引
$A_2$	鸟类活动	$X_{12}$	重量 0.3~ 1kg 的个鸟撞飞机	$X_{37}$	建筑物平顶对鸟的吸引
$A_3$	鸟的类型	$X_{13}$	重量 50~ 300g 的群鸟撞飞机	$X_{38}$	机库和塔台等建筑物对鸟的吸引
$A_4$	吸引鸟类的因子	$X_{14}$	重量 50~ 300g 的个鸟撞飞机	$X_{39}$	农作物特别是谷物对鸟的吸引
$A_5$	机场内吸引鸟类的因子	$X_{15}$	重量小于 50g 的群鸟撞飞机	$X_{40}$	水产业设施对鸟的吸引
$A_6$	机场外吸引鸟类的因子	$X_{16}$	重量小于 50g 的个鸟撞飞机	$X_{41}$	家畜饲养场对鸟的吸引
$A_7$	机场内农业或植被吸引鸟类的因子	$X_{17}$	农作物(特别是谷物)对鸟的吸引	$X_{42}$	谷物存放地或加工厂对鸟的吸引
$A_8$	机场内废物与污物吸引鸟类的因子	$X_{18}$	犁地、割草和收割(啮齿动物、昆虫、蠕虫)对鸟的吸引	$X_{43}$	饭店(特别是室外就餐区)对鸟的吸引
$A_9$	机场内水源吸引鸟类的因子	$X_{19}$	风景美化(果实和栖息地)对鸟的吸引	$X_{44}$	野餐区域和公园对鸟的吸引
$A_{10}$	机场内其他吸引鸟类的因子	$X_{20}$	树枝、灌木和小块林地对鸟的吸引	$X_{45}$	游艇码头对鸟的吸引
$A_{11}$	机场外农业活动吸引鸟类的因子	$X_{21}$	树木等筑巢地对鸟的吸引	$X_{46}$	高尔夫球场对鸟的吸引
$A_{12}$	机场外商业和娱乐用地吸引鸟类的因子	$X_{22}$	鸟类和哺乳动物的饲料对鸟的吸引	$X_{47}$	工厂厂房对鸟的吸引
$A_{13}$	机场外废物吸引鸟类的因子	$X_{23}$	食品废物存放地对鸟的吸引	$X_{48}$	垃圾船对鸟的吸引
$A_{14}$	机场外水源吸引鸟类的因子	$X_{24}$	垃圾堆对鸟的吸引	$X_{49}$	垃圾堆对鸟的吸引

(续表)

代码	事件名称	代码	事件名称	代码	事件名称
$A_{15}$	机场外其他区域吸引鸟类的因子	$X_{25}$	干草对鸟的吸引	$X_{50}$	垃圾转运站对鸟的吸引
$X_1$	跑道滑跑阶段(高度 0m)撞鸟	$X_{26}$	污泥地、泻湖和排水口对鸟的吸引	$X_{51}$	鱼加工厂对鸟的吸引
$X_2$	起飞和着陆阶段(高度 0~120m)撞鸟	$X_{27}$	杂草、建筑物和废旧物场对鸟的吸引	$X_{52}$	污水塘和排水口对鸟的吸引
$X_3$	初始爬升和着陆前进近(高度 120~500m)撞鸟	$X_{28}$	动物尸体对鸟的吸引	$X_{53}$	鱼塘对鸟的吸引
$X_4$	中期爬升和航线下降(高度 500~1000m)撞鸟	$X_{29}$	水生植物对鸟的吸引	$X_{54}$	河道溪流对鸟的吸引
$X_5$	后期爬升和航线下降(高度 1000~3000m)撞鸟	$X_{30}$	运河、沟渠、小溪和排水沟对鸟的吸引	$X_{55}$	湖面和江面对鸟的吸引
$X_6$	巡航和固定空域飞行(高度大于 3000m)撞鸟	$X_{31}$	道面和地面低洼积水区对鸟的吸引	$X_{56}$	野生动物庇护所和自然保护区对鸟的吸引
$X_7$	重量大于 1.8kg 的群鸟撞飞机	$X_{32}$	水池和除冰液对鸟的吸引	$X_{57}$	农庄对鸟的吸引
$X_8$	重量大于 1.8kg 的个鸟撞飞机	$X_{33}$	喷泉对鸟的吸引	$X_{58}$	森林对鸟的吸引
$X_9$	重量 1~1.8kg 的群鸟撞飞机	$X_{34}$	跑道上的蚯蚓对鸟的吸引	$X_{59}$	湿地、沼泽地和污泥滩对鸟的索引

## 1.2 故障树定性分析

定性分析是求出故障树的所有最小割集,最小割集是指导致顶事件发生的最起码的基本事件的组合,根据基本事件的组合个数,最小割集分为一阶最小割集、二阶最小割集以及更高阶的最小割集。本文采用 Fussel 算法(下行法)求解最小割集,将故障树转化为等效的布尔代数方程,即

$$T = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6) \cdot (X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}) \cdot (X_{17} + X_{18} + \dots + X_{59}) \quad (1)$$

由于式(1)展开后共 2580 项且均为三阶,可见故障树由 2580 个三阶最小割集组成。一般情况下,割集数越小,它发生的可能性越大。因此,为提高系统安全性,应首先考虑发生概率较大或危险性较大的一阶最小割集。本故障树较为特殊,需考虑所有割集。

## 2 故障树底事件概率的确定

### 2.1 模糊数、隶属度函数及 $\lambda$ 截集

专家判断法是确定事件发生概率的常用方法之一<sup>[4]</sup>。模糊集理论<sup>[5]</sup>能将现实生活中的模糊现象定量地表示出来,为描述和处理具有模糊性的现象提供了一种有效的数学手段。专家判断过程中采用“很小、小、较小、中等、较大、大、很大”等自然语言描述事件发生概率。本文用三角形或梯形模糊数代替这些自然语言,如图 2 所示,三角形模糊数表示为  $A = (a, b, c)$ ,梯形模糊数表示为  $A = (a, b, c, d)$ ,其隶属度函数表达式分别为

$$A(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ \frac{x-a}{b-a} & (a \leq x \leq b) \\ \frac{c-x}{c-b} & (b < x \leq c) \\ 0 & (x > c) \end{cases} \quad (2)$$

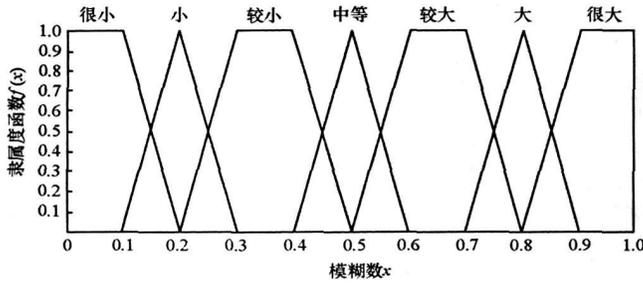


图2 代表自然语言的模糊数

Fig. 2 Fuzzy expression representing linguistic values

$$A(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq a) \\ \frac{x-a}{b-a} & (a < x \leq b) \\ 1 & (b < x \leq c) \\ \frac{d-x}{d-c} & (c < x \leq d) \\ 0 & (x > d) \end{cases} \quad (3)$$

模糊数形式和  $\lambda$  截集如表 2 所示。表中“VL、L、FL、M、FH、H、VH”分别代表“很小、小、较小、中等、较大、大、很大”。以 4 位有经验的专家评价底事件  $X_{24}$ “垃圾堆对鸟类的吸引”这一底事件概率为例, 进行后续步骤计算和分析。

表 2 模糊数形式和  $\lambda$  截集Tab. 2 Form of fuzzy values and cut volume of  $\lambda$ 

模糊语言	模糊数形式	$\lambda$ 截集
很小	$f_{VL} = (0, 0, 0.1, 0.2)$	$f_{VL}^\lambda = [0, -0.1\lambda + 0.2]$
小	$f_L = (0.1, 0.2, 0.3)$	$f_L^\lambda = [0.1\lambda + 0.1, -0.1\lambda + 0.3]$
较小	$f_{FL} = (0.2, 0.3, 0.4, 0.5)$	$f_{FL}^\lambda = [0.1\lambda + 0.2, -0.1\lambda + 0.5]$
中等	$f_M = (0.4, 0.5, 0.6)$	$f_M^\lambda = [0.1\lambda + 0.4, -0.1\lambda + 0.6]$
较大	$f_{FH} = (0.5, 0.6, 0.7, 0.8)$	$f_{FH}^\lambda = [0.1\lambda + 0.5, -0.1\lambda + 0.8]$
大	$f_H = (0.7, 0.8, 0.9)$	$f_H^\lambda = [0.1\lambda + 0.7, -0.1\lambda + 0.9]$
很大	$f_{VH} = (0.8, 0.9, 1, 1)$	$f_{VH}^\lambda = [0.1\lambda + 0.8, 1]$

## 2.2 专家权重的确定

根据专家的情况, 考虑 3 个权重项, 每项又分为 5 个等级<sup>[6]</sup>, 采用强制比较法对其赋予不同的权值, 具体分配情况见表 3。根据下式可以求出第  $i$  位专家的重要度权重, 即

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^3 w_{ij}}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 w_{ij}} \quad (4)$$

其中,  $i$  为专家号,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $j$  为项目号,  $j = 1, 2, 3$ 。根据具体情况, 可以得出各位专家的权重: 专家  $a$  权重 0.2857, 专家  $b$  权重 0.2667, 专家  $c$  权重 0.2381, 专家  $d$  权重 0.2095。

表3 专家构成和权重因素

Tab.3 Construction of experts and the weights factors

项目	等级	权值	项目	等级	权值	项目	等级	权值
职称	正高职称	15	学历	研究生	5	工龄	$q \geq 30$	10
	副高职称	12		本科	4		$20 \leq q < 30$	8
	中级职称	9		大专	3		$10 \leq q < 20$	6
	初级职称	6		中专	2		$5 \leq q < 10$	4
	技术工人	3		中专以下	1		$q < 5$	2

## 2.3 底事件发生概率确定

(1) 计算平均模糊数  $W$ 。4 位专家对  $X_{23}$  这一底事件的可能性大小作出判断, 对应的评估意见分别是“大、很大、大、较大”。对这 4 位专家的评价意见应进行综合处理。常用的方法是选用模糊集的  $\lambda$  截集来组合专家的意见<sup>[7]</sup>。在  $\lambda$  截集下, 4 位专家意见的平均模糊数为

$$\begin{aligned}
 W &= f_H \dot{Y} f_{VH} \dot{Y} f_H \dot{Y} f_{HH} = [0.2857 \odot (0.1\lambda + 0.7) + 0.2667 \odot (0.1\lambda + 0.8) + 0.2381 \odot (0.1\lambda + 0.7) \\
 &+ 0.2095 \odot (0.1\lambda + 0.5), 0.2857 \odot (-0.1\lambda + 0.9) + 0.2667 \odot (1) + 0.2381 \odot (-0.1\lambda + 0.9) \\
 &+ 0.2095 \odot (-0.1\lambda + 0.8)] \\
 &= [0.1\lambda + 0.68477, -0.07333\lambda + 0.90572] \quad (5)
 \end{aligned}$$

由模糊集扩展理论可知,  $W$  也为模糊集。令  $W_\lambda = [z_1, z_2] = [0.1\lambda + 0.68477, -0.07333\lambda + 0.90572]$ , 则  $\lambda$  分别为:  $\lambda = (z_1 - 0.68477)/0.1$ ,  $\lambda = (0.90572 - z_2)/0.07333$ , 则平均模糊数  $W$  的关系函数为

$$f_w(z) = \begin{cases} \frac{z - 0.68477}{0.1} & (0.68477 < z \leq 0.78477) \\ 1 & (0.78477 < z \leq 0.83239) \\ \frac{0.90572 - z}{0.07333} & (0.83239 < z \leq 0.90572) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 把模糊数转化为模糊可能性值  $FPS$ 。由于在分析底事件发生的概率时引入了模糊数, 则在故障树分析中就必须把模糊数转化为一个清晰值, 即模糊可能性值( $FPS$ )<sup>[4]</sup>。本文采用左右模糊排序法, 把模糊数转化为  $FPS$ 。该方法定义最大模糊集和最小模糊集为

$$f_{\max} = \begin{cases} x & (0 < x < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{\min} = \begin{cases} 1 - x & (0 < x < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

则模糊数  $W$  的左右模糊可能性值分别为

$$FPS_R(W) = \sup_x [f_w(x) \wedge f_{\max}(x)] = 0.84384 \quad (9)$$

$$FPS_L(W) = \sup_x [f_w(x) \wedge f_{\min}(x)] = 0.28657 \quad (10)$$

$W$  的模糊可能性值为

$$FPS(W) = [FPS_R(W) + (1 - FPS_L(W))]/2 = 0.77863 \quad (11)$$

(3) 把  $FPS$  转化为模糊失效率( $FFR$ )。故障树底事件发生的概率, 其中一些可能已知其确定的发生概率, 有的则是由模糊集理论和专家判断法相结合得到的。为了保证确定的失效率和模糊失效率之间的一致性, 必须把  $FPS$  转化为模糊失效率  $FFR$ <sup>[8]</sup>, 即

$$FFR = \begin{cases} 1/10^K & (FPS \neq 0) \\ 0 & (FPS = 0) \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $K = \left[ \frac{1 - FPS}{FPS} \right]^{1/3} \times 2.301$ 。通过计算, 得  $K = 1.5130$ ,  $FFR = 0.03069$ , 即“垃圾堆对鸟的吸引”的概率为 0.03069。利用程序或电子表格可以得到故障树中其他底事件的概率。

### 3 故障树定量分析

#### 3.1 故障树顶事件概率

利用不交布尔代数法求顶事件发生的概率<sup>[9]</sup>。设故障树的全部最小割集为  $K_1, K_2, \dots, K_n$ ,  $n$  为最小割集总数即 2580。设底事件  $X_i$  的发生概率  $Q_i = P(X_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, 59$ ), 则故障树顶事件  $T$  发生的概率为

$$P(T) = P\left(\bigcup_{j=1}^n k_j\right) = \sum_{i=1}^n P(k_i) - \sum_{i < j=2}^n P(k_i k_j) + \sum_{i < j < k=3}^n P(k_i k_j k_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(k_1 k_2 \dots k_n) \quad (13)$$

其中,  $P(k_j) = \prod_{i \in k_j} Q_i$ 。利用程序或电子表格计算得顶事件发生的概率为 0.00241。

#### 3.2 故障底事件重要度分析

各底事件概率重要度 ( $I_p$ ) 和相对概率重要度 ( $I_c$ ) 分析是故障树定量分析中的重要内容<sup>[9]</sup>。

某底事件概率重要度表示当该底事件发生概率的微小变化而导致顶事件发生概率的变化率, 即

$$I_p(i) = \frac{\partial g(Q)}{\partial Q_i} \quad (14)$$

其中,  $g(Q) = P(T)$ , 为顶事件发生的概率。在实际计算中, 将底事件概率分别置 1 和 0 后算得顶事件概率的差值<sup>[10]</sup>, 即为此底事件的概率重要度。利用程序和电子表格计算表明, 底事件  $X_1 \sim X_6$  的概率重要度数值基本相近 (0.02810 ~ 0.02952), 底事件  $X_7 \sim X_{16}$  的概率重要度数值基本相近 (0.03297 ~ 0.03403), 底事件  $X_{17} \sim X_{59}$  的概率重要度数值基本相近 (0.00299 ~ 0.00320)。

某底事件相对概率重要度表示当该底事件发生概率的微小相对变化而导致顶事件发生概率的相对变化率, 即

$$I_c(i) = \frac{Q_i}{g(Q)} \times \frac{\partial g(Q)}{\partial Q_i} = \frac{Q_i}{g(Q)} \times I_p(i) \quad (15)$$

利用程序和电子表格计算出各底事件相对概率重要度  $I_c$ , 根据  $I_c$  数值可以对底事件隐患从大到小进行排序, 例如底事件  $X_2, X_3, X_{12}, X_{13}$  和  $X_{14}$  相对概率重要度数值明显偏高, 其数值分别为 0.58870、0.28410、0.17466、0.14782 和 0.43987。在底事件  $X_{17} \sim X_{59}$  中,  $X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{30}$  和  $X_{41}$  相对概率重要度数值比其他底事件相对概率重要度数值大, 其数值分别为 0.03098、0.03916、0.03772、0.03876 和 0.03816。

### 4 结论

(1) 模糊故障树分析方法克服了底事件难以精确赋值的缺点, 对现有机场环境安全评估及机场鸟害防治、新建机场规划选址的鸟害比较评估, 提供了有效方法和有价值的研究思路。

(2) 从相对概率重要度排序结果看, 飞机起降阶段、初始爬升、着陆前进近阶段是防范撞鸟的重要时期, 飞机应尽可能地大坡度起降、爬升和着陆前进近, 尽量缩短此阶段留空时间。对重量 50~ 300g 的个鸟需重点防范和控制, 同时关注重量 300~ 1000g 的个鸟和重量 50~ 300g 的群鸟, 根据其活动规律, 适时调整飞行计划。在机场环境和土地使用中, 应重点对食品废物存放地、垃圾堆、家畜饲养场、污泥池、泻湖、排水口、运河、沟渠、小溪和排水沟等设置和使用进行严格管控。

### 参考文献:

- [1] 章国栋, 陆延孝, 等. 系统可靠性与维修的分析与设计[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1990.
- [2] 肖丹, 秦文贵, 等. 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, 2006, 33(5): 43- 46.
- [3] 朱震江, 杨晓翔. 城市埋地管道模糊故障树分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(12): 1686- 1690.
- [4] Chen S J, Hwang C L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [5] 赵德孜, 温卫东, 等. 故障树模糊分析方法的研究[J]. 机械设计与制造, 2003(4): 35- 38.
- [6] 霍春勇, 董玉华. 管道故障树基本事件分析的德尔斐法[J]. 油气储运, 2002, 24(1): 8- 11.
- [7] Lin C T, Wang M J. Hybrid Fault Tree Analysis Using Fuzzy Sets[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 58: 205- 213.
- [8] Onisawa T. An Approach to Human Reliability in Man-machine Systems Using Error Possibility[J]. Fuzzy Sets and System, 1988, 27(2): 87- 103.
- [9] 中华人民共和国国家标准 GB7829- 87 故障树分析程序[S]/1987.
- [10] 王永传, 郁文贤, 等. 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.