

# 结构矢量法的模糊故障树重要度分析

许勇<sup>1</sup>, 董欢<sup>2</sup>, 毕凯<sup>3</sup>, 鹿传国<sup>4</sup>, 张志峰<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学校务部, 西安, 710051;  
3. 93293 部队, 沈阳, 110000; 4. 95806 部队, 北京, 100076)

**摘要** 针对模糊故障树分析中,重要度分析描述复杂、抽象含义不明确以及不利于重要度排序等问题,提出基于结构矢量的重要度分析方法。首先将梯形模糊数抽象为匀质梯形,将梯形模糊数的变化抽象为梯形质心的矢量变化。而后利用质心变化矢量在水平和垂直方向上的分量定义模糊故障树中故障率的变化量、梯形模糊数模糊度的变化量以及故障率的变化率。最后以某型雷达水冷系统故障为顶事件,通过重要度分析验证了所提方法的有效性。

**关键词** 模糊故障树;梯形模糊数;重要度分析;结构矢量

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.012

**中图分类号** TB114.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0064-06

## Research on Importance Analysis of Fuzzy Fault Tree Based on Structure Vector

XU Yong<sup>1</sup>, DONG Huan<sup>2</sup>, BI Kai<sup>3</sup>, LU Chuanguo<sup>4</sup>, ZHANG Zhifeng<sup>1</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. Department of School Affairs, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
3. Unit 93293, Shenyang 110000, China; 4. Unit 95806, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that the description of importance analysis is complex, abstract conception is uncertain, and these are unfavorable ordering for fuzzy fault tree analysis, a new importance analysis method based on structure vector is proposed. First of all, the trapezoid fuzzy number is abstracted as uniformity trapezoid and its change is abstracted as the shifty vector of the trapezoid center. And then, the horizontal mapping of shifty vector is used to define the variation of error rate and vary rate of error rate. Meanwhile, the vertical mapping of shifty vector is used to define the irresolute degree of trapezoid fuzzy number. At last, the fault of cooling system of a certain radar is treated as the top event, and the method proposed is proved by importance analysis.

**Key words:** fuzzy fault tree; trapezoid fuzzy number; importance analysis; structure vector

为解决传统故障树中事件故障率难以准确获得的问题,文献[1]将模糊理论引入到故障树分析中,利用模糊概率替代精确数值,利用模糊扩展理论定义事件间的逻辑运算,并采用近似计算实现模糊数

之间的乘积运算。文献[2]则基于模糊理论给出一种计算机辅助设计的故障树分析方法,实现了故障树构建、计算最小割集等,利用静态和动态结构分析和建模实现系统模糊可靠性分析。文献[3]将模糊

**收稿日期:** 2016-06-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(61601498); 国家社科基金(16BGL221)

**作者简介:** 许勇(1986—),男,山东潍坊人,博士生,主要从事安全管理研究.E-mail: 15373319555@163.com

**引用格式:** 许勇,董欢,毕凯,等. 结构矢量法的模糊故障树重要度分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):64-69. XU Yong, DONG Huan, BI Kai, et al. Research on Importance Analysis of Fuzzy Fault Tree Based on Structure Vector[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 64-69.

故障树分析与动态故障树分析相结合,给出了 2 种模糊动态故障树分析方法,模糊马尔科夫模型的动态故障树分析和连续时间贝叶斯网络的动态模糊故障树分析。当前模糊故障树分析已经广泛应用于矿产<sup>[4]</sup>、军事<sup>[5]</sup>、机械<sup>[6]</sup>、航空<sup>[7]</sup>等领域。

上述文献虽然对模糊故障树的构建、评价、逻辑运算等方面进行了较为广泛的研究,但是对于模糊描述情况下,故障树中事件的重要度研究相对较少,且存在一定缺陷。如缺乏底事件与顶事件故障率间的渐变描述。文献[8]基于模糊可靠性理论将传统故障树的概率重要度拓展为模糊概率重要度,该方法不仅需要故障树中各底事件的基本可靠度,还需要普通可靠度对于事件状态的隶属度,描述复杂。文献[9]利用三角模糊数描述顶事件和底事件的故障概率,获得较全面分析结果,但截集划分规模显著影响运算的时间复杂性,并且未能给出不同截集下重要度排序的综合方法。基于此,本文提出一种基于结构矢量的模糊故障树重要度分析方法。

### 1 模糊故障树重要度分析

#### 1.1 模糊数的几何抽象

由文献[1]可知,梯形模糊数经过故障树的逻辑运算,其结果仍为梯形模糊数。因此梯形模糊数的变化可抽象为 2 个梯形的形变,即将数值变化映射为图形形变。

在直角坐标系中,设图形区域为  $\sigma$ , 密度为  $\nu(x, y)$ , 则其质心坐标可表示为:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint_{\sigma} x\nu(x, y) dx dy}{\iint_{\sigma} \nu(x, y) dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint_{\sigma} y\nu(x, y) dx dy}{\iint_{\sigma} \nu(x, y) dx dy} \end{cases} \quad (1)$$

对于抽象梯形,可将其视为匀质,即  $\nu(x, y) = 1$ 。

#### 1.2 模糊数变化的抽象

直接利用二重定积分计算图形的质心过程繁琐,且不利于分析,本节利用材料力学中常用的分割法计算梯形质心。以图 1 所示梯形  $abcd$  为例,上底边  $dc$  在  $y=1$  直线上,下底边  $ab$  在  $x$  轴上,4 个顶点在  $x$  坐标值均在  $[0, 1]$  区间内。利用直线  $ac$  将梯形划分为 2 个等高三角形  $abc$  和三角形  $acd$ 。

两三角形的质心分别为其顶点坐标的算术平均数,则三角形  $abc$  质心  $M_{abc}$  的坐标见式(2)。

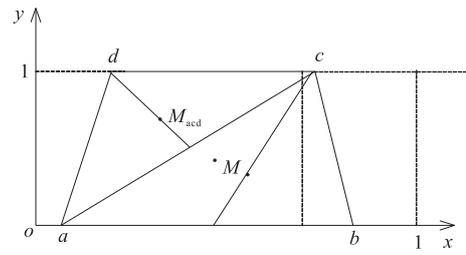


图 1 梯形分割示意图

Fig.1 The diagram of trapezoidal integral

$$\begin{cases} \bar{x}_{abc} = (x_a + x_b + x_c) / 3 \\ \bar{y}_{abc} = (y_a + y_b + y_c) / 3 \end{cases} \quad (2)$$

三角形  $acd$  的质心  $M_{acd}$  为。

$$\begin{cases} \bar{x}_{acd} = (x_a + x_c + x_d) / 3 \\ \bar{y}_{acd} = (y_a + y_c + y_d) / 3 \end{cases} \quad (3)$$

$S_{abcd}$ 、 $S_{abc}$ 、 $S_{acd}$  表示面积,质心  $M$  坐标为:

$$\begin{cases} \bar{x}_M = \frac{S_{abc} \bar{x}_{abc} + S_{acd} \bar{x}_{acd}}{S_{abcd}} \\ \bar{y}_M = \frac{S_{abc} \bar{y}_{abc} + S_{acd} \bar{y}_{acd}}{S_{abcd}} \end{cases} \quad (4)$$

将面积和坐标的表达式带入式(4)得:

$$\begin{cases} \bar{x}_M = \frac{1}{3} \frac{x_c^2 + x_b^2 - x_a^2 - x_d^2 + x_b x_c - x_a x_d}{x_c + x_b - x_a - x_d} \\ \bar{y}_M = \frac{1}{3} \frac{x_b + 2x_c - x_a - 2x_d}{x_c + x_b - x_a - x_d} \end{cases} \quad (5)$$

质心坐标方程对  $x_a$ 、 $x_b$ 、 $x_c$ 、 $x_d$  求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_a} = \frac{1}{3} \frac{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2 - (x_c - x_d)(x_b - x_d)}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \\ \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_b} = \frac{1}{3} \frac{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2 - (x_c - x_d)(x_c - x_a)}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \\ \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_c} = \frac{1}{3} \frac{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2 - (x_b - x_d)(x_b - x_a)}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \\ \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_d} = \frac{1}{3} \frac{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2 - (x_b - x_a)(x_c - x_a)}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_a} = \frac{1}{3} \frac{x_c - x_d}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \\ \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_b} = \frac{1}{3} \frac{x_d - x_c}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \\ \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_c} = \frac{1}{3} \frac{x_b - x_a}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \\ \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_d} = \frac{1}{3} \frac{x_a - x_b}{(x_b + x_c - x_a - x_d)^2} \end{cases} \quad (7)$$

设  $x_a$ 、 $x_b$ 、 $x_c$ 、 $x_d$  的水平增量均为  $\Delta x$ ，分析式(6)和式(7)可得如下结论：

**性质 1** 对于图 1 所示梯形  $abcd$ ，任意顶点沿  $x$  轴正向移动，则梯形质心  $M$  的位移矢量在  $x$  轴上的分量为正。

证明：由梯形  $abcd$  的描述可知：

$$x_a \leq x_d < x_c \leq x_b$$

$$\text{即, } (x_b + x_c - x_a - x_d)^2 > (x_c - x_d)(x_b - x_d)$$

$$\text{又, } (x_b + x_c - x_a - x_d)^2 > 0$$

$$\text{则, } \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_a} > 0, \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_b} > 0, \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_c} > 0, \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_d} > 0$$

又， $\Delta x > 0$ ，所以，质心  $M$  的位移矢量在  $x$  轴上的分量为：

$$\int_{x_a}^{x_a+\Delta x} \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_a} dx_a > 0, \int_{x_b}^{x_b+\Delta x} \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_b} dx_b > 0,$$

$$\int_{x_c}^{x_c+\Delta x} \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_c} dx_c > 0, \int_{x_d}^{x_d+\Delta x} \frac{\partial \bar{x}_M}{\partial x_d} dx_d > 0$$

则性质 1 得证。

**性质 2** 对于图 1 所示梯形  $abcd$ ，①若  $a$ 、 $c$  顶点沿  $x$  轴正向移动，则梯形质心  $M$  位移矢量在  $y$  轴上的分量为正；若  $b$ 、 $d$  顶点沿  $x$  轴正向移动，则梯形质心  $M$  位移矢量在  $y$  轴上的分量为负；②若  $a$ 、 $b$  顶点或  $c$ 、 $d$  顶点沿  $x$  轴正向的位移量相等时，梯形质心  $M$  位移矢量在  $y$  轴上的分量为 0。

证明：由梯形  $abcd$  的描述可知：

$$x_a \leq x_d < x_c \leq x_b$$

$$\text{则, } x_c - x_d > 0, x_b - x_a > 0$$

$$\text{又, } (x_b + x_c - x_a - x_d)^2 > 0$$

$$\text{则, } \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_a} > 0, \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_b} < 0, \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_c} > 0, \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_d} < 0$$

所以，质心  $M$  位移矢量在  $y$  轴上的分量为：

$$\int_{x_a}^{x_a+\Delta x} \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_a} dx_a > 0, \int_{x_b}^{x_b+\Delta x} \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_b} dx_b < 0$$

$$\int_{x_c}^{x_c+\Delta x} \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_c} dx_c > 0, \int_{x_d}^{x_d+\Delta x} \frac{\partial \bar{y}_M}{\partial x_d} dx_d < 0$$

命题①得证。

再将  $x_a + \Delta x$  和  $x_b + \Delta x$  分别代入式(8)中的  $\bar{y}_M$  可得：

$$\frac{1}{3} \frac{(x_b + \Delta x) + 2x_c - (x_a + \Delta x) - 2x_d}{x_c + x_b - x_a - x_d} = \bar{y}_M$$

即当  $x_a$  和  $x_b$  的正向位移量相等时，梯形质心  $M$  位移矢量在  $y$  轴上的分量为 0。

同理可得，当  $x_c$  和  $x_d$  的正向位移量相对时，梯

形质心  $M$  位移矢量在  $y$  轴上的分量为 0。

命题②得证。则性质 2 得证。

性质 1 说明梯形任意顶点  $x$  轴坐标增加，则其质心  $x$  轴坐标增加。

性质 2 则说明梯形仅上底或下底位置变化，但长度不变时，其质心  $y$  轴坐标不变。

### 1.3 基于质心变化矢量的模糊故障树分析

对于梯形模糊数，若将其隶属度近似看作概率密度函数，则其质心的  $x$  轴坐标(见式(1))可近似看作故障率的期望与梯形面积的比值。又由性质 1 可知，梯形模糊数任意顶点的  $x$  轴增量均将引起质心的  $x$  轴增量。基于此，这里利用质心  $x$  轴坐标表示梯形模糊数的整体故障率。为便于描述模糊故障率的变化量，进行如下定义。

**定义 1** 模糊故障率变化量(Change of Fuzzy Error Rate, CFER, 式中用  $C_F$  表示)。在模糊故障树中，任意事件故障率的变化量可表示为其梯形模糊数质心  $x$  轴坐标的变化量，见式(11)：

$$C_F = \bar{x}'_M - \bar{x}_M \tag{8}$$

式中： $\bar{x}'_M$  和  $\bar{x}_M$  分别为梯形模糊数变化前后质心的  $x$  轴坐标。

梯形模糊数中，下底为隶属度非零的  $x$  轴上区间，上底为隶属度为 1 的  $x$  轴上区间。由性质 2 可知，当梯形模糊数上底和下底区间长度不发生变化时，梯形质心的  $y$  轴坐标不发生变化；当上底长度增加时，梯形质心上移， $y$  轴坐标增大；当下底长度增加时，梯形质心下移， $y$  轴坐标减小。

因此，可用质心  $y$  轴的坐标值描述底边长度的变化，记梯形模糊数的模糊度(Fuzzy Degree, FD, 式中用  $F_D$  表示)为：

$$F_D = \frac{x_b - x_a}{x_c - x_d} \tag{9}$$

可知  $F_D \in [1, +\infty)$ ，其值越大表示确信区间在非零区间上所占比例越小。由式(8)可知：

$$x_b - x_a = (2 - 3\bar{y}_M)(x_c + x_b - x_a - x_d) \tag{10}$$

$$x_c - x_d = (3\bar{y}_M - 1)(x_c + x_b - x_a - x_d) \tag{11}$$

将式(13)、(14)代入式(12)，可得模糊度与质心  $y$  轴坐标间关系如下：

$$F_D = \frac{2 - 3\bar{y}_M}{3\bar{y}_M - 1} \tag{12}$$

**定义 2** 模糊度的变化量(Change of Fuzzy Degree, CFD, 式中用  $C_{FD}$  表示)。在模糊故障树中，任意事件模糊度的变化量可表示为梯形模糊数质心  $y$  轴坐标的变化函数的绝对值，形式如式(13)：

$$C_{FD} = \left| \frac{2 - 3 \bar{y}_M}{3 \bar{y}_M - 1} - \frac{2 - 3 \bar{y}_M}{3 \bar{y}_M - 1} \right| \quad (13)$$

$C_{FD}$  值越大,表示梯形模糊数的  $y$  轴方向形变量越大。

令  $\bar{x}_M^T$  表示顶事件  $T$  的整体故障率,  $x_i^t$  表示第  $i$  个底事件的梯形模糊数顶点  $\tau$  的  $x$  轴坐标,  $\tau = a, b, c, d$ , 则:

$$\bar{x}_M^T = f(g_a(x_a^1, \dots, x_a^n), g_b(x_b^1, \dots, x_b^n), g_c(x_c^1, \dots, x_c^n), g_d(x_d^1, \dots, x_d^n)) \quad (14)$$

式中:  $f$  为梯形模糊数的质心函数,  $g_*$  为模糊故障树中顶事件与底事件逻辑结构函数。

**定义 3** 模糊故障率变化率(Change Rate of Fuzzy Error Rate, CRFER, 式中用  $C_{RF}$  表示)。在模糊故障树中,顶事件故障率的变化率可表示为其

梯形模糊数质心  $x$  轴坐标与底事件模糊故障树各顶点的偏导数之和,如式(15):

$$C_{RF}(x_i) = \frac{\partial \bar{x}_M^T}{\partial x_a^i} + \frac{\partial \bar{x}_M^T}{\partial x_b^i} + \frac{\partial \bar{x}_M^T}{\partial x_c^i} + \frac{\partial \bar{x}_M^T}{\partial x_d^i} \quad (15)$$

$C_{RF}$  值越大,表示底事件  $x_i$  模糊故障率的变化对顶事件的影响较大,反之,则影响较小。

综上,模糊故障树中底事件的重要度可以通过模糊故障率变化量、模糊度变化量以及模糊故障率变化率进行分析。

## 2 实例分析

水冷系统是相控阵雷达发射机系统的重要组成部分,用于为雷达末级多注速调管的收集极、管体和聚焦提供 3 路一定流量的冷却液,确保雷达发射机处于相对稳定的温度范围内,其功能示意图 2。

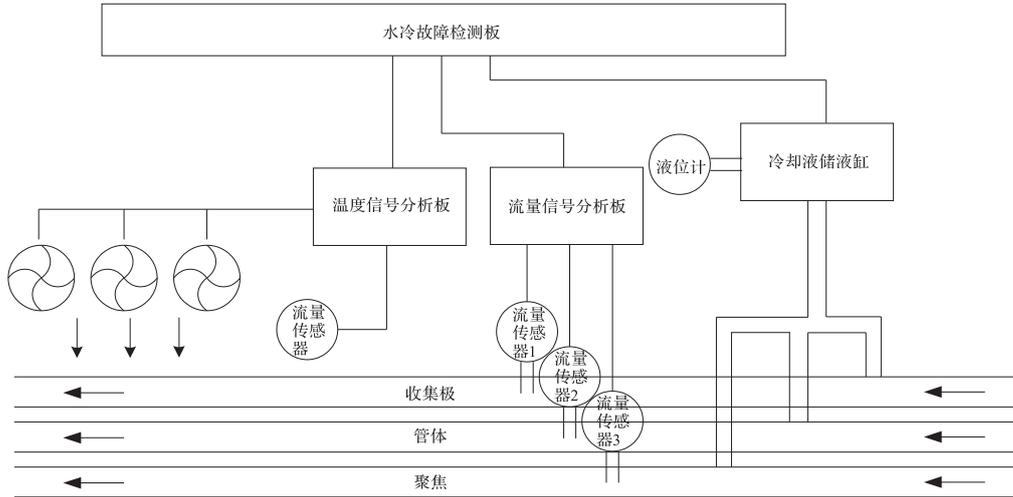


图 2 水冷系统功能示意图

Fig.2 The functional diagram of the water-cooling system

图中温度传感器用于对工作环境温度进行实时监测,温度信号分析板将温度传感器中的频率信号转换为电压,通过与标准值比较,启动风机进行二次风冷,当环境温度过高时,将故障信号送到水冷故障监测板;流量传感器对收集极、管体和聚焦的冷却液进行流量监测,流量分析板则从流量传感器上读取频率信号并转化为电压,与流量基本数值进行对比,当低于系统要求时,产生故障信号,送往水冷故障监测板;液位计则采集储液缸内冷却液的液位信息,送往水冷故障监测板,当液位低于标准值时,产生故障信号。

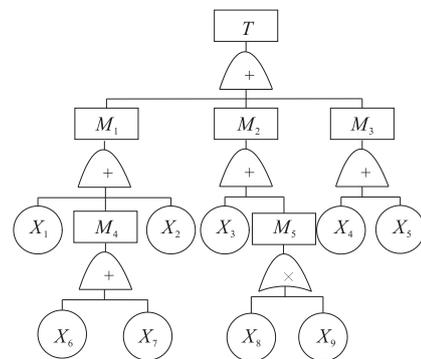


图 3 水冷系统故障树

Fig.3 Fault tree of the water-cooling system

以水冷系统故障,即水冷故障监测板产生故障信号为顶事件,假定系统线路正常,无线路连接故障,水冷故障监测板正常,水冷系统的故障树见图3<sup>[11-13]</sup>,图中事件代号说明见表1。

表1 故障事件代码表

Tab.1 Code table of fault events

代号	名称	代号	名称
T	水冷系统故障	X <sub>3</sub>	温度分析板故障
M <sub>1</sub>	流量信号分析板报故	X <sub>4</sub>	液位计故障
M <sub>2</sub>	温度信号分析板报故	X <sub>5</sub>	储液罐漏液
M <sub>3</sub>	液位传感器报故	X <sub>6</sub>	管路堵塞
M <sub>4</sub>	管路冷却液流量不足	X <sub>7</sub>	泵故障
M <sub>5</sub>	工作环境温度过高	X <sub>8</sub>	风机故障
X <sub>1</sub>	流量传感器故障	X <sub>9</sub>	系统工作时间过长
X <sub>2</sub>	流量分析板故障		

由 B.L.Browning 推荐事件故障率<sup>[10]</sup>,结合日常维护经验,底事件的故障率见表2。

表2 底事件模糊故障率

Tab.2 Fuzzy fault rate of bottom events

代号	模糊故障率(10 <sup>-6</sup> /h)
X <sub>1</sub>	(3.250,4.000,4.500,5.250)
X <sub>2</sub>	(11.550,13.450,14.500,16.400)
X <sub>3</sub>	(14.750,16.650,17.700,19.600)
X <sub>4</sub>	(0.025,0.040,0.060,0.075)
X <sub>5</sub>	(8.755,10.585,12.375,14.205)
X <sub>6</sub>	(0.015,0.070,0.090,0.145)
X <sub>7</sub>	(55.395,70.825,90.225,105.655)
X <sub>8</sub>	(43.785,57.890,85.780,99.885)
X <sub>9</sub>	(0.002,0.006,0.008,0.010)

表3 底事件重要度对比

Tab.3 The contrast for importance of bottom events

代号	重要度 <sup>[1]</sup> (10 <sup>-6</sup> )	故障率变化量(10 <sup>-6</sup> )	模糊度变化量	故障率变化率
X <sub>1</sub>	16.999 783 29	4.249 945 576	0.024 939 001	0.999 988 026
X <sub>2</sub>	55.899 348 77	13.974 836 6	0.082 170 024	0.999 988 985
X <sub>3</sub>	68.699 225 45	17.174 805 77	0.082 170 053	0.999 989 305
X <sub>4</sub>	0.199 997 27	0.049 999 312	0.000 282 502	0.999 987 616
X <sub>5</sub>	45.919 448 2	11.479 861 45	0.016 921 529	0.999 988 73
X <sub>6</sub>	0.319 995 46	0.079 998 85	0.003 077 4	0.999 987 619
X <sub>7</sub>	322.098 436 6	80.524 607 56	1.075 624 261	0.999 995 386
X <sub>8</sub>	2.1×10 <sup>-7</sup>	5.289 88×10 <sup>-8</sup>	1.567 82×10 <sup>-8</sup>	6.101 03×10 <sup>-10</sup>
X <sub>9</sub>	2.1×10 <sup>-7</sup>	5.289 88×10 <sup>-8</sup>	1.567 82×10 <sup>-8</sup>	6.848 38×10 <sup>-6</sup>

表4 底事件评估结果排序

Tab.4 The sort of assessment result to bottom events

代号	重要度 <sup>[1]</sup>	故障率变化量	模糊度变化量	故障率变化率
X <sub>1</sub>	5	5	4	5
X <sub>2</sub>	3	3	2	3
X <sub>3</sub>	2	2	3	2
X <sub>4</sub>	7	7	7	7
X <sub>5</sub>	4	4	5	4
X <sub>6</sub>	6	6	6	6
X <sub>7</sub>	1	1	1	1
X <sub>8</sub>	8	8	8	9
X <sub>9</sub>	8	8	8	8

由图3所示故障树可知,顶事件故障率为:

$$\begin{cases} P_T = 1 - (1 - P_{M_1}) (1 - P_{M_2}) (1 - P_{M_3}) \\ P_{M_1} = 1 - (1 - P_{X_1}) (1 - P_{M_4}) (1 - P_{X_2}) \\ P_{M_2} = 1 - (1 - P_{X_3}) (1 - P_{M_5}) \\ P_{M_3} = 1 - (1 - P_{X_4}) (1 - P_{X_5}) \\ P_{M_4} = 1 - (1 - P_{X_6}) (1 - P_{X_7}) \\ P_{M_5} = P_{X_8} P_{X_9} \end{cases}$$

将表2中模糊故障率代入可得:

$$P_T = (93.7397, 115.6196, 139.4495, 161.3293) \times 10^{-6}$$

利用文献[1]中重要度计算方法和1.3节所提故障率变化量、模糊度变化量以及故障率变化率进行对比,可得到表3结果。其中,文献[1]中重要度、故障率变化量和模糊度变化量均为表2故障状态时的取值与对应底事件故障率为0时取值之差。

再对表3结果按列进行排序,数值最大的编为1,其他按数值大小依次排序,可得表4。

分析表3、表4可见,文献[1]中所述重要度和故障率变化量均为底事件故障发生与未发生时刻的顶事件故障率变化量,二者排序一致,即泵对系统稳定性影响最大,温度信号分析板、流量信号分析板对系统稳定性影响较大,储液罐密封性、流量传感器、管路流通性以及液位计对系统的影响相对较小,风机以及工作时间对系统的影响最小。

进一步分析,泵作为较大功率机械部件,本身具有较高故障率,且当其出现故障时,严重影响系统正常工作,因而具有最高重要度,温度信号分析板和流量信号分析板为集成电路,相对稳定,但易受工作电压、电流的影响,损坏部分较脆弱元器件,因而对系统具有较高重要度。流量传感器、液位计为简单电子元件,稳定性较高;储液罐内部密封环、圈等,只有长时间与轻微腐蚀性冷却液接触才可能造成密封性失效;管路内为过滤后冷却液,一般很难造成堵塞,只有在管路发生弯折时,可能影响冷却液流量,因而对系统影响较低。风机虽为机械部件,自身故障率较高,但只有在系统长时间工作,环境温度极高时才造成系统故障,而系统连续工作时间一般不会过长,

因而对系统稳定性影响最低。

考虑底事件对顶事件模糊度的影响,其排序结果与故障率变化量排序基本一致,仅流量信号分析板和温度信号分析板的排序,流量传感器和储液罐的排序发生互换,表明在 y 轴方向上,即顶事件质心的垂直方向上,流量信号分析板的重要度要高于温度信号分析板,流量传感器的重要度要高于储液罐。再考虑底事件故障率的微小变化对顶事件故障率的影响,其排序结果与故障率变化量类似,仅风机和工作时间出现重要度区分,工作时间重要度要高于风机。风机虽然具有较高故障率,但是以系统的长时间工作作为前提的,因而二者的重要度排序合理。

综上所述,本文所提 3 种重要度的评估标准均能从不同的侧面给出系统中不同事件的重要度排序,具有一定合理性。

### 3 结语

本文针对模糊故障树重要度分析中描述复杂、抽象含义不明确以及不利于排序等问题,给出一种基于结构矢量的重要度分析方法。通过抽象构造模糊故障率的变化矢量并分解,从矢量水平位移、垂直位移以及水平位移变化率 3 个角度分析事件重要度。最后通过某型雷达水冷系统的故障事例分析验证所提方法的合理性。需要指出的是,本文方法虽然基于梯形模糊数给出,但其抽象的思想并不局限于梯形模糊数,可通过不同的质心构造方法应用于其他类型的模糊数。

#### 参考文献(References):

- [1] TANAKA Hideo, FAN L T, LAI F S, et al. Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1983, 32(5): 453-457.
- [2] KHAN R F, VEITCH B. Methodology for Computer Aided Fuzzy Fault Tree Analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(4): 217-226.
- [3] 李彦锋. 复杂系统动态故障树分析的新方法及其应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.  
LI Yanfeng. New Methods of Dynamic Fault Tree Analysis of Complex System and its Application[D]. Chengdu: A Doctor Dissertation Submitted to University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [4] 田晓翠. 基于模糊故障树的矿井提升机故障诊断[D]. 西安:长安大学, 2015.  
TIAN Xiaocui. Mine Hoist Fault Diagnosis Based on Fuzzy

- Fault Tree[D]. Xi'an: A Doctor Dissertation Submitted to University of Chang AN of China, 2015. (in Chinese)
- [5] 蔡伟, 王瑞林, 李涛. 基于模糊故障树的某型步枪子弹故障机理分析[J]. 科技通报, 2013, 29(6): 50-52.  
CAI Wei, WANG Ruilin, LI Tao. Jamming of Cartridge of Certain Rifle Mechanism Analysis Based on Fuzzy Fault Tree [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(6): 50-52. (in Chinese)
- [6] 刘英, 陈志恒, 陈宇. 基于模糊故障树的数控刀架系统可靠性分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(1): 80-84.  
LIU Ying, CHEN ZHiheng, CHEN Yu. Reliability Analysis of CNC Turret System Based on Fuzzy Fault Tree [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(1): 80-84. (in Chinese)
- [7] 侯金丽, 金平, 蔡国飏. 基于模糊故障树和因子化分析的重复使用火箭发动机失效模式[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 987-992.  
HOU Jinli, JIN Ping, CAI Guobiao. Failure Mode of Reusable Rocket Engine Based on Fuzzy Fault Tree and Factor Analysis [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 987-992. (in Chinese)
- [8] 李廷杰. 故障树分析中的模糊概率重要度[J]. 系统工程理论与实践, 1990, (1): 9-12.  
LI Tingjie. Fuzzy Probability Importance Degree of Fault Tree Analysis [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1990, (1): 9-12. (in Chinese)
- [9] 古莹奎, 朱繁流, 唐淑云. 基于模糊概率重要度的可靠性分析方法[J]. 江西理工大学学报, 2012, 33(5): 51-55.  
GU Yingkui, ZHU Fanlong, TANG Shuyun. Reliability Analysis Method Based on Fuzzy Probability Importance Degree [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2012, 33(5): 51-55. (in Chinese)
- [10] CHENG S R, LIN B S, HSU B M, et al. Fault-tree Analysis for Liquefied Natural Gas Terminal Emergency Shutdown System [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(9): 11918-11924.
- [11] CHEN Hao, JIANG Mei, YAN Jing, et al. Fault Tree Analysis of a Launching with Binary Decision Diagram Method and Fuzzy Theory [J]. Journal of Donghua University (Eng. Ed.), 2015, 32(6): 961-964.
- [12] ZHANG Jinle, PENG Wensheng, ZHANG Jianguo, et al. Reliability Analysis of Integrated Transmission Based on Fuzzy Multi-state Fault Tree [J]. 4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (ICCMCEE 2015): 514-521.
- [13] LI C, ANAVATTI S G, RAY T. Analytical Hierarchy Process Using Fuzzy Inference Technique for Real-Time Route Guidance System. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 84-93.

(编辑:姚树峰)