

# 考虑系统非关键状态影响的阀门模糊可靠性评价方法<sup>\*</sup>

## VALVE FUZZY RELIABILITY EVALUATION METHOD BASED ON THE INFLUENCE OF NON - CRITICAL STATE OF THE SYSTEM

俞树荣<sup>\*\*</sup> 罗炜晔<sup>\*\*\*</sup> 薛睿渊 尹思敏 李勇霖

(兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050)

YU ShuRong LUO WeiYe XUE RuiYuan YIN SiMin LI YongLin

(College of Petroleum and Chemical Engineering, Lanzhou University of Technology,  
Lanzhou 730050, China)

**摘要** 目前运用常规可靠性模型对阀门进行单一指标的可靠性评估,其结果只有两种状态:系统完全正常、系统完全故障。很难判断阀门系统处在从“完好”到“失效”之间的何种状态。同时忽视系统非关键状态对系统可靠度影响和仅用单一指标进行评估,会造成评估结果不够充分的问题。为此提出一种基于三重指标的阀门模糊评价方法。该方法将阀门系统失效概率 $P_F$ 、考虑系统非关键状态影响的失效概率 $P_{EF}$ 及平均故障间隔时间 MTBF 作为指标进行可靠性灰数聚类评估。其中考虑系统非关键状态影响的失效概率通过系统累计失效概率及期望状态转换次数求得。算例结果表明该方法可以很好的表达系统非关键状态对可靠度的影响且能得出系统可靠的具体处在何种水平。

**关键词** 失效概率 可靠性评估 模糊理论 MTBF

中图分类号 U462.3<sup>+5</sup>

**Abstract** At present, the reliability of a single indicator is evaluated by a conventional reliability model. The results have only two states: the system is completely normal and the system is completely faulty. It is difficult to determine what state the valve system is between “good” and “failed”. At the same time, ignoring the impact of non-critical state of the system on system reliability and evaluating method with a single indicator will result in insufficient evaluation results. Therefore, a fuzzy evaluation method based on triple index was proposed. The valve system failure probability  $P_F$ , the failure probability considering the influence of non-critical states of the system  $P_{EF}$  and the mean time between failures MTBF as the indicators to evaluate the reliability gray number clustering were considered. The failure probability considering the influence of the non-critical state of the system was obtained by the cumulative failure probability of the system and the number of expected state transitions. The experimental results indicated that the method can well describe the influence of the non-critical state of the system on the reliability and can determine the reliable level of the system.

**Key words** Failure probability; Reliability assessment; Fuzzy theory; MTBF

Corresponding author: YU ShuRong E-mail: 674013073@qq.com

Manuscript received 20190716, in revised form 20190828

### 引言

阀门作为核电系统中的重要设备,准确且充分的评估其可靠性至关重要<sup>[1]</sup>。目前机械可靠性评估的常用方法是基于零部件失效概率通过多种重要度函数计算求得评估结果<sup>[2]</sup>。刘成龙等针对复材层合板可靠性分析涉及多种相关性而导致分析难的问题,提出一种基于发生函数复合运算、失效准则及强度理论的分析模型。据此模型得到可靠度值来进行可靠性评

估<sup>[3]</sup>。此类单纯依据可靠度值或失效概率值来进行可靠性分析确实能够准确表达出系统“完好”或“故障”的概率。但评价指标过于单一容易造成评估结果不充分的问题,同时此类方法并未将系统非关键状态考虑进来。Amp W S 在大修后车辆的可靠性评估中引入了多指标评估方法,解决了依据单一指标所造成的评估结果不充分的问题<sup>[4]</sup>。Wang X J 等在城市电网运行可靠性评估中引入多模型技术,同样弥补了单一指标进行可靠性评估的不足<sup>[5]</sup>。但以上方法同样没

<sup>\*</sup> 20190716 收到初稿,20190828 收到修改稿。

<sup>\*\*</sup> 俞树荣,男,1962年生,兰州理工大学教授,博士,主要研究方向为承压类特种设备的失效分析和安全评价。

<sup>\*\*\*</sup> 罗炜晔(通信作者),男,1993年生,兰州理工大学硕士研究生,主要研究方向为过程装备可靠性与风险评价技术。

有考虑系统非关键状态的影响,且评估结果不能表达出系统到底处于“完好”至“失效”之间的何种状态。此类问题需要应用模糊数学来解决。将模糊理论应用至可靠性评估的例子很多。如祝红林在对事故树底事件发生概率判别时,运用模糊理论方法来考虑底事件的随机性<sup>[6]</sup>;梁芬等将模糊理论应用到焊接机的故障诊断中。以此来克服传统故障树分析法的缺点,使其不需要精确了解故障机理就能找到系统的薄弱环节<sup>[7]</sup>;马冬等将模糊理论应用至失效状态的判别中,从而使考虑因素更加全面<sup>[8]</sup>。以上学者均很好的将模糊理论方法与可靠性评估过程中的失效判别相结合,从而避免在失效判别过程中的“一刀切”问题。但都未能摆脱评估结果过于二值化的问题;不能具体准确表达出阀门可靠性处于何种水平;针对系统非关键状态影响的问题依然没有被考虑。

经过以上分析可知,现有方法很难具体得出系统可靠度到底处于“失效”和“完好”之间的何种状态。同时其对于系统非关键状态对可靠性影响的忽视也造成了可靠性评估不够充分。基于这些问题,提出一种三重指标的,考虑系统非关键状态影响的模糊可靠性评价方法。该方法将阀门失效过程看成一系列状态转换的过程。根据系统所有状态存在概率及通过累积失效概率计算求得的期望状态转换次数,将系统所有状态对系统可靠度的影响等效进失效概率中,得到考虑系统非关键状态影响的失效概率。并将此与失效概率及 MTBF 共同组成模糊可靠性评价的三重指标,通过模糊理论聚类评估方法得出阀门系统可靠度水平。最终算例验证该方法的可行性及工程意义。

## 2 系统非关键状态影响计算

### 2.1 计算系统非关键状态影响的基本原理

阀门系统失效是由“无任何部件失效”状态到“系统失效”状态的转变过程。阀门系统当量失效概率计算新方法由随机过程分析根据飞机易损性中的“等效单一易损面积”计算的思路<sup>[9]</sup>以及可靠性模型中等效目标失效概率计算<sup>[10]</sup>来确定的。通过系统中间状态及失效状态存在的概率和与期望状态转换次数的比值来将非关键状态(中间状态)的影响考虑进来。设  $P_{EF}$  为阀门系统当量失效概率, $E$  为系统期望无故障状态转换次数。则  $P_{EF}$  为

$$P_{EF} = \sum_{w=1}^{N-1} p_w / E \quad (1)$$

其中  $p_w$  为第  $w$  状态考虑后果差异的失效概率。期望无故障状态转换次数的计算要求出阀门系统若干状态转化后的累积失效概率。马尔可夫模型可解决系统中状态转换概率求值问题。因此首先利用马尔可夫模

型计算若干状态转化后阀门系统的累积存在概率;根据数学期望的原理,并结合累积存在概率推导出导致阀门系统失效的期望状态转化次数。

### 2.2 状态转换累积失效概率计算

计算系统多次状态转换后累计失效概率的思路是将系统多次工作模型转化为一个马尔可夫过程<sup>[11]</sup>。则第  $i+1$  次工作后各个状态概率矢量为

$$S^{(i+1)} = TS^{(0)} \quad (2)$$

其中  $T$  为概率转换矩阵。转换矩阵  $T$  是这个马尔可夫模型的关键。 $T$  是代表了阀门系统所有存在状态的集合。 $T_{iq}$  是指阀门系统从第  $q$  个状态转换到第  $i$  个状态的概率。 $T_{iq}$  为

$$T_{iq} = \sum_{w=1}^N P_w \quad (3)$$

将阀门系统的零部件都看成不可修复的零部件。这样做的目的是简化分析过程。将阀门看成不可修复的系统,其在  $\Delta t$  内修复的概率等于零<sup>[12]</sup>。则阀门有  $q$  状态转化成  $i$  状态的状态转换式

$$P_0(t + \Delta t) = [1 - P_{iq}]P_0(t) + 0P_1(t) \quad (4)$$

类似地,阀门在时刻  $t + \Delta t$  处于故障状态的概率为

$$P_1(t + \Delta t) = P_{iq}P_0(t) + 1P_1(t) \quad (5)$$

阀门系统在第  $j+1$  次状态转换后的累积失效概率为

$$\bar{P}_F^{j+1} = S_1^{(j+1)} \quad (6)$$

### 2.3 期望无故障状态转换次数计算

令随机变量  $Q_N$  为

$$Q_N = \begin{cases} 1 & N \text{ 次状态转换后系统可靠} \\ 0 & N \text{ 次状态转换后系统失效} \end{cases} \quad (7)$$

因此随机变量

$$Q = \sum_{N=0}^{+\infty} Q_N = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots \quad (8)$$

表示阀门系统失效时的状态转换次数。假设 为阀门系统在状态转换了  $N$  次后的累积失效概率,则

$$P = \begin{cases} 1 - \bar{P}_F^N & Q_N = 1 \\ \bar{P}_F^N & Q_N = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由数学期望的性质,有

$$E = E(Z) = E(Q_0) + E(Q_1) + \dots \quad (10)$$

$$E = \sum_{N=0}^{+\infty} 1 \times (1 - \bar{P}_F^N) + 0 \times \bar{P}_F^N = \sum_{N=0}^{+\infty} (1 - \bar{P}_F^N) \quad (11)$$

由于  $\bar{P}_F^0 = 0, \bar{P}_F^{N+1} \geq \bar{P}_F^N, \bar{P}_F^{+\infty} = 1$ 。当  $\bar{P}_F^N$  随着状态转换次数  $N$  的不断增大而增大,并在无穷大的时候趋近于 1,因此计算  $E$  的公式为

$$E = \sum_{N=0}^{N_{end}} (1 - \bar{P}_F^N) \quad (12)$$

其中,  $N_{end}$  可以由式(15)确定

$$1 - \bar{P}_F^{N_{end}} < \varepsilon \quad (13)$$

式中  $\varepsilon$  为无穷小量。

### 3 模糊可靠性评价

#### 3.1 确定主要因素集

主要因素集为选定的模糊可靠性评价指标。这些可靠性评估指标都可以从不同的角度反应系统可靠性。所提基于考虑系统非关键状态影响的失效概率的模糊可靠性评价方法主要针对机械系统,依据机械系统实际工作情况及数据背景,选择  $P_F$ 、 $P_{EF}$  及 MTBF 作为模糊可靠性评估指标。

其中系统失效概率  $P_F$  为单纯考虑系统失效状态下的概率。系统非关键状态影响的失效概率  $P_{EF}$  是将系统除失效状态及无任何部件故障状态以外等“中间状态”对系统可靠度的影响等效至失效概率数据。 $P_F$  和  $P_{EF}$  分别具有不同的物理意义,二者分别代表了失效状态的概率及“中间状态”对于系统可靠度的影响。MTBF 可以通过系统失效概率计算获得。

#### 3.2 模糊可靠性指标权重的计算

确定模糊可靠性指标权重的步骤: 构建比较判断矩阵; 单一准则情况下计算相对权重; 一致性检验。一致性检验是判断可靠性指标权重赋值的方式,通过一致性检验则认为赋值合理,未通过则认为不合理。构建比较矩阵通过两两比较的方式获得,用比较标度  $a_{ij}$  来表示下一次中第  $i$  个元素与第  $j$  个元素对上一层的相对重要性<sup>[13]</sup>。一般  $a_{ij}$  的取值参照表 1。

即比较判断矩阵  $A$  为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

权重值通过归一判断矩阵行或列向量获得。归一判断矩阵的列向量,按式

$$\tilde{A}_{ij} = \left( \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right) \quad (15)$$

针对式(15)得到的按行计算得相对权重

$$\tilde{W} = \left( \frac{\sum_{j=1}^n \frac{a_{1j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_{1j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}, \frac{\sum_{j=1}^n \frac{a_{2j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_{2j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}, \cdots, \frac{\sum_{j=1}^n \frac{a_{nj}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_{nj}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}} \right)^T = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^T \quad (16)$$

表 1 判断矩阵中元素的确定标准

Tab.1 Judging criteria for determining elements in a matrix	
$a_{ij}$ 的取值 The value of $a_{ij}$	含义 Meaning
1	$A_i$ 与 $A_j$ 同样重要 $A_i$ is as important as $A_j$
3	$A_i$ 比 $A_j$ 稍微重要 $A_i$ is slightly more important than $A_j$
5	$A_i$ 比 $A_j$ 明显重要 $A_i$ is obviously more important than $A_j$
7	$A_i$ 比 $A_j$ 重要得多 $A_i$ is much more important than $A_j$
9	$A_i$ 比 $A_j$ 极端重要 $A_i$ is extremely important than $A_j$
2, 4, 6, 8	介于上述相邻两种情况之间 Between the two adjacent cases
以上各数的倒数 Reciprocal of the above numbers	两元素反过来比较 The two elements are reversed

将  $\tilde{W}$  按式(17)做归一化处理

$$\omega_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (17)$$

得权重矢量为

$$W = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)^T \quad (18)$$

按式(5)得出判断矩阵的最大特征根

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n\omega_i} \quad (19)$$

为避免人的主观性造成判断矩阵的不一致。因此,需要通过一致性检验来确认判断矩阵争取与否。

令一致性指标(CI)满足式

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (20)$$

式中  $\lambda_{max}$  为判断矩阵  $A$  的最大特征值,  $n$  为矩阵的阶数。

CI 值越小,判断矩阵的一致性越好。当  $\lambda_{max} = n$ ,  $CI = 0$ , 判断矩阵完全一致。随机因素同样会导致一致性的偏差。因此 CI 还需要与平均随机一致性指标(RI)进行比较。RI 见表 2,一致性比例(CR)如式

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (21)$$

表 2 平均随机一致性指标

Tab.2 Average random consistency indicator									
$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.94	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

$CR < 0.1$ , 则认为比较判断矩阵的一致性良好,否则需要修正。由于  $n < 3$  时,判断矩阵总是一致的,因此当  $n = 1, 2$  时,  $RI = 0$ 。

### 3.3 可拓区间的确定

$P_F$ 、 $P_{EF}$  及 MTBF 三种模糊可靠性评估指标,在评估过程中可以被分为“高”、“较高”、“一般”和“低”四个灰类,分别用 I、II、III、IV 来表示。聚类评估的区间拓展由指标的区间估计结果计算得来。令数据中最大值为  $t_1$ ,最小值为  $t_s$ ,指标区间的上限为  $a_L$ ,下限为  $a_s$ ,指标估计区间中值如

$$a_M = \frac{a_L + a_s}{2} \quad (22)$$

指标区间的中值为

$$t_M = \frac{t_L + t_s}{2} \quad (23)$$

聚类分界点的划分为

$$b_1 = \frac{t_L + a_M}{2} \quad (24)$$

$$b_2 = \frac{a_M + t_M}{2} \quad (25)$$

$$b_3 = \frac{a_M + t_s}{2} \quad (26)$$

当指标值在  $(0, b_3)$  时,区间内属于“低”;当指标值在  $(b_3, b_2)$  时,区间内属于“一般”;当指标值在  $(b_2, b_1)$  时,区间内属于“较高”;当指标值在  $(b_1, \infty)$  时,区间内属于“高”。

### 3.4 构建模糊可靠性聚类评估矩阵

令  $d_i$  为第  $i$  个指标所拥有的白化数据。阈值为灰类的中心值,阈值的计算如

$$\lambda_{1i} = \frac{r_{1i}}{2} \quad (27)$$

式中  $\lambda_{1i}$  为第  $i$  个指标的第一类白化权函数的阈值,  $r_{1i}$  为第  $i$  个指标的第 I 级的界限值

$$\lambda_{ni} = 2r_{ni} - \lambda_{(n-1)i} \quad (28)$$

式中  $\lambda_{ni}$  为第  $i$  个指标的第  $n$  类白化权函数的阈值,  $r_{ni}$  为第  $i$  个指标的第  $n$  级的界限值

$$\lambda_{ji} = \frac{(r_{ji} + r_{(j-1)i})}{2} \quad (29)$$

式中  $\lambda_{ji}$  为第  $i$  个指标的第  $j$  类白化权函数的阈值,  $r_{ji}$ 、 $r_{(j-1)i}$  分别为第  $i$  个指标的第  $j$  级和第  $j-1$  级的界限值。

白化权函数共有三种最基本的形式:

灰数  $\in [0, \lambda_{1i}, \lambda_{2i}]$ ,白化权函数具体表达式为

$$\begin{cases} f_i(d_i) = (\lambda_{2i} - d_i) / (\lambda_{2i} - \lambda_{1i}) & d_i \in [\lambda_{1i}, \lambda_{2i}] \\ f_i(d_i) = 1 & d_i \in [0, \lambda_{1i}] \end{cases} \quad (30)$$

式中  $\lambda_{2i}$  为第  $i$  个指标的第 II 类白化权函数的阈值。

灰数  $\in [\lambda_{(j-1)i}, \lambda_{ji}, \lambda_{(j+1)i}]$ ,白化权函数具体表达式为

$$\begin{cases} f_i = (d_i - \lambda_{(j-1)i}) / (\lambda_{ji} - \lambda_{(j-1)i}) & d_i \in [\lambda_{(j-1)i}, \lambda_{ji}] \\ f_i = 1 & d_i = \lambda_{ji} \\ f_i = 0 & d_i \notin [\lambda_{(j-1)i}, \lambda_{(j+1)i}] \\ f_i = (\lambda_{(j+1)i} - d_i) / (\lambda_{(j+1)i} - \lambda_{ji}) & d_i \in [\lambda_{ji}, \lambda_{(j+1)i}] \end{cases} \quad (31)$$

式中  $\lambda_{(j-1)i}$  为第  $i$  个指标的第  $j-1$  类白化权函数的阈值;  $\lambda_{ji}$  为第  $i$  个指标的第  $j$  类白化权函数的阈值;  $\lambda_{(j+1)i}$  为第  $i$  个指标的第  $j+1$  类白化权函数的阈值。

灰数  $\in [\lambda_{(n-1)i}, \infty]$ ,白化权函数具体表达式为

$$\begin{cases} f_i = (d_i - \lambda_{(n-1)i}) / (\lambda_{ni} - \lambda_{(n-1)i}) & d_i \in [\lambda_{(n-1)i}, \lambda_{ni}] \\ f_i = 1 & d_i \in [\lambda_{ni}, \infty] \end{cases} \quad (32)$$

式中  $\lambda_{(n-1)i}$  为第  $i$  个指标的第  $n-1$  类白化权函数的阈值;  $\lambda_{ni}$  为第  $i$  个指标的第  $n$  类白化权函数的阈值。

当白化权函数为  $\lambda_{ji}$  时,则此白化权函数与第  $i$  个指标的第  $j$  个灰类最为亲密,函数值最大为 1。白化权函数的等级范围为  $[\lambda_{(n-1)i}, \infty)$ 。当无灰类中心值时,则阈值按第  $n-1$  类与第  $n$  类的交界处两类白化权函数相等的原则确定。

通过上述方法确定白化权函数阈值,结合聚类的可拓区间建立不同等级的白化权函数。通过白化权函数来表示一个灰数对其取值范围内不同数值的“亲疏程度”构建综合评估矩阵

$$R = (r_{ij})_{n \times m}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (33)$$

式中  $r_{ij}$  为矩阵元素。

最终建立了综合评估模型为

$$B = R\omega^T \quad (34)$$

### 3.5 可靠性灰数聚类评估

根据实际工程经验,将这四个灰类的灰值确定为:  $C = \{1.0, 0.8, 0.6, 0.4\}$ ,四个评判等级如表 3。

表 3 可靠性分级表

Tab. 3 Reliability rating table

可靠性水平 Reliability level	高 High	较高 Higher	一般 General	低 Low
区间值 Interval value	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	<0.4

由综合评估模型和灰色聚类等级,建立综合聚类评估模型如式(35)

$$Q = B \times C \quad (35)$$

将综合聚类评估模型所得到的值与表 2 进行比较,得出系统可靠性等级。

## 4 实例验证

选取某一核级截止阀为例进行验证计算。此截止阀应用于核电厂反应堆冷却剂系统中的化学与容积控

制系统。输送介质为反应堆冷却剂。

### 4.1 $P_{EF}$ 计算

根据阀门某核一级截止阀的结构分析和工作特性,参考王悦琴学者对核一级电动波纹管截止阀的故障模式影响分析<sup>[14]</sup> 结合实际工程经验。可以列出截止阀失效模式有  $X_{11}$ : 阀体动作不到位;  $X_{12}$ : 阀体损坏;  $X_{13}$ : 阀体滞后运行;  $X_{14}$ : 阀体滞后运行;  $X_{21}$ : 阀杆断裂;  $X_{22}$ : 阀杆咬合;  $X_{23}$ : 阀杆动作缓慢;  $X_{24}$ : 阀杆开焊;  $X_{25}$ : 阀杆连接脱开;  $X_{31}$ : 阀瓣剥落;  $X_{32}$ : 阀瓣卡住;  $X_{41}$ : 阀盖与阀体之间泄露;  $X_{51}$ : 气装故障;  $X_{61}$ : 密封圈切破损伤、腐蚀变质;  $X_{71}$ : 填料松动。

建立截止阀故障树如图 1。为简化模型,气装部分作为一个影响阀门系统的单独部件进行整体考虑。

并用布尔代数法进行逻辑运算,对故障体系进行求解化简

$$T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = X_{14} + X_{24} + X_{25} + X_{61} + X_{71} + X_{12} + X_{31} + X_{41} + X_{51} + X_{11} + X_{21} + X_{22} + X_{32} + X_{13}X_{23}$$

其中,最小割集为  $X_{14}$ 、 $X_{24}$ 、 $X_{25}$ 、 $X_{61}$ 、 $X_{71}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{31}$ 、 $X_{41}$ 、 $X_{51}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{21}$ 、 $X_{22}$ 、 $X_{32}$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{23}$ 。根据截止阀故障树可知,其共有 15 个底事件。可造成阀门系统故障的最小割集有 14 个。

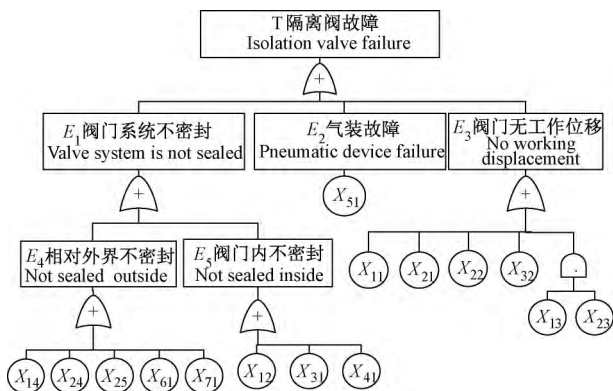


图 1 截止阀故障树

Fig. 1 Globe valve fault tree

根据截止阀故障树的布尔代数法简化结果可得到截止阀的结构函数

$$\phi(X) = X_{11} \vee X_{12} \vee X_{14} \vee X_{21} \vee X_{22} \vee X_{24} \vee X_{25} \vee X_{31} \vee X_{32} \vee X_{41} \vee X_{51} \vee X_{61} \vee X_{71} \vee (X_{13} \wedge X_{23})$$

其中,  $\vee$  为“或”运算符,  $\wedge$  为“与”运算符。那么

$$\phi(X) = X_{11} + X_{12} + X_{14} + X_{21} + X_{22} + X_{24} + X_{25} + X_{31} + X_{32} + X_{41} + X_{51} + X_{61} + X_{71} + X_{13}X_{23}$$

由以上简化的结构函数可知结构可靠度

$$G(X) = q_{11} + q_{12} + q_{14} + q_{21} + q_{22} + q_{24} + q_{25} + q_{31} + q_{32} + q_{41} + q_{51} + q_{61} + q_{71} + q_{13}q_{23}$$

根据俄罗斯标准 CT ЦКБА 008-2011 和

ГОСТ 27.301-95 中的单个零部件失效概率数据可得到截止阀系统中各个零部件的失效概率区间值,如表 4。

表 4 零部件失效概率区间值

Tab. 4 Component failure probability interval value

失效模式 Failure mode	最小值 Minimum value	平均值 Average value	最大值 Maximum
$X_{11}$	0.965 5	0.965 5	0.993 3
$X_{12}$	0.965 5	0.983 1	0.993 3
$X_{13}$	0.965 5	0.983 1	0.993 3
$X_{14}$	0.965 5	0.983 1	0.993 3
$X_{21}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{22}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{23}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{24}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{25}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{31}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{32}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{41}$	0.995	0.998	0.999
$X_{51}$	0.997	0.998 3	0.999 4
$X_{61}$	0.989	0.995	0.998
$X_{71}$	0.995	0.998	0.999

截止阀状态可分为“无任何部件故障状态”、“阀门失效状态”和“中间状态”三种。由此可列出截止阀系统所有状态列表,如表 5。截止阀系统一共存在 4 种状态。因此状态转换矩阵  $T$  为 4 阶矩阵。据式 (5)、式 (6) 可以列出转换矩阵。根据式 (1)、式 (2)、式 (6) 可以计算出截止阀系统状态转换  $N$  次后的累积当量失效概率  $\bar{P}_F^N$ , 根据公式 (10) 确定  $N_{end}$ , 本例中  $\varepsilon = 10^{-5}$ 。

表 5 阀门系统存在状态及概率范围

Tab. 5 Valve system existence status and probability range

状态 Status	存在状态 State of existence	概率范围 Probability range
1	系统失效状态 System failure status	[0.028 3, 0.145 6]
2	只有编号 13 失效模式状态 Only number 13 failure	[0.006 4, 0.029 7]
3	只有编号 23 失效模式状态 Only number 23 failure	[0.000 6, 0.002 5]
4	无任何部件失效 No component failure	[0.830 6, 0.964 9]

截止阀系统失效概率区间、 $P_{EF}$ 、阀门系统期望状态转换次数可见表 6。

表 6 算例结果

Tab. 6 Results of the study

失效概率 Failure probability $p_F$	状态转换期望次数 State transition expectation $E$	$P_{EF}$
[0.028 3, 0.145 6]	1.201	[0.029 4, 0.148 1]

### 4.2 主要因素集的确定

本文选取  $P_{EF}$ 、 $P_F$ 、MTBF 为模糊可靠性评价的主要因素集。根据俄罗斯标准 CT ЦКБА 008-2011 和

ГОСТ27.301-95 中此阀门失效概率估计区间为  $[0.02 \ 0.1]$ 。此标准中将截止阀的故障看作服从指数型分布进行计算,因此阀门可靠度估计区间可以依据指数型可靠性指标计算公式得出 MTBF 区间估计。根据俄罗斯标准,当阀门的寿命分布服从指数分布时, MTBF 为

$$MTBF = 3000 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 3000 \frac{1}{\lambda} \quad (36)$$

将阀门失效概率估计区间为  $[0.03 \ 0.12]$  代入式 (37) 中,得 MTBF 区间估计为  $[25 \ 000, 100 \ 000]$ 。对于  $P_{EF}$ ,由于其不能简单通过可靠性指标转换公式进行计算,因此在计算  $P_{EF}$  区间估计时可将表 5 中的系统失效概率数值替换成系统失效概率区间估计值,并运用  $P_{EF}$  计算方法重新计算。最终得阀门系统  $P_{EF}$  区间估计为  $[0.022 \ 5 \ 0.11]$ 。

由表 6 可知阀门系统失效概率实际值区间为  $[0.028 \ 3 \ 0.145 \ 6]$ ,将失效概率实际值区间代入式 (36) 可得 MTBF 实际区间为  $[20 \ 604, 1 \ 059 \ 906]$ , $P_{EF}$  的实际值区间可由表 6 给出为  $[0.029 \ 4 \ 0.148 \ 1]$ 。

#### 4.3 可靠聚类评估

##### (1) 计算指标值

由以上内容,由表 6 中的各故障模式的可靠度结合故障树可计算出阀门故障概率值为 0.051 63;同样将表 6 中的可靠度中值代入式 (3)、式 (4)、式 (6)、式 (7)、式 (8)、式 (15) 中并结合期望状态转换次数  $E = 1.201$ ,可得阀门  $P_{EF}$  为 0.074;将阀门故障概率值 0.051 63 代入式 (36) 可得到 MTBF 的估计中值为 57 749。

##### (2) 计算权重

选择  $P_F$ 、 $P_{EF}$ 、平均故障前间隔时间 (MTBF) 阀门系统可靠性模糊评价指标。根据表 1 中的判断矩阵中元素的确定标准,最终确定判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

归一化得权重为  $\omega = (0.769 \ 2 \ 0.153 \ 8 \ 0.077)$  计算判断矩阵  $A$  的最大特征根

$$AW = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.7692 \\ 0.1538 \\ 0.077 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.0072 \\ 0.4616 \\ 0.2638 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n\omega_i} = \frac{1}{3} \left( \frac{2.0072}{0.7692} + \frac{0.4616}{0.1538} + \frac{0.2638}{0.077} \right) = 3.0426$$

$$\text{检验矩阵 } A \text{ 的一致性 } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.0426 - 3}{3 - 1} =$$

0.021 3 由于矩阵  $A$  是 3 阶矩阵,故选  $RI = 0.58$ ,则  $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0213}{0.58} = 0.037 < 0.1$ ,矩阵  $A$  通过一致性检验。

##### (3) 可拓区间计算

$P_F$  的实际值的上限为 0.145 6,下限为 0.028 3;区间估计值得上限为 0.1,下限为 0.02。将以上数据代入到式 (22)、式 (23)、式 (24)、式 (25)、式 (26) 当中,得  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的值分别为 0.102 8、0.073 4、0.044 2。则指标在  $(0, 0.044 \ 2)$  区间内属于“高”;指标在  $(0.044 \ 2, 0.073 \ 4)$  区间内属于“较高”;指标在  $(0.073 \ 4, 0.102 \ 8)$  区间内属于“一般”;指标在  $(0.102 \ 8, \infty)$  区间内属于“低”。

MTBF 的实际值得上限为 105 996,下限为 20 604;区间估计值得上限为 100 000,下限为 25 000。将以上数据代入到式 (22)、式 (23)、式 (24)、式 (25)、式 (26) 当中,得  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的值分别为 84 248、52 596、41 552。则指标在  $(84 \ 248, \infty)$  区间内属于“高”;指标在  $(52 \ 598, 84 \ 248)$  区间内属于“较高”;指标在  $(41 \ 552, 52 \ 598)$  区间内属于“一般”;指标在  $(0, 41 \ 552)$  区间内属于“低”。

$P_{EF}$  的实际值的上限为 0.148 1,下限为 0.029 4;区间估计值得上限为 0.11,下限为 0.022 5。将以上数据代入到式 (22)、式 (23)、式 (24)、式 (25)、式 (26) 当中,得  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的值分别为 0.107 2、0.077 5、0.047 8。则指标在  $(0, 0.047 \ 8)$  区间内属于“高”;指标在  $(0.047 \ 8, 0.077 \ 5)$  区间内属于“较高”;指标在  $(0.077 \ 5, 0.107 \ 2)$  区间内属于“一般”;指标在  $(0.107 \ 2, \infty)$  区间内属于“低”。

##### (4) 确定白化权函数

###### 1) $P_F$

记阀门失效概率  $P_F$  第 I 类的上限为 0.044 2,第 II 类中限为 0.058 8,第 III 类中限为 0.088 1,第 IV 类下限为 0.102 8。

###### ① 第 I 类 指标 $P_F \in [0 \ 0.044 \ 2)$

$$f_1(P_F) = \begin{cases} 1 & P_F \leq 0.0442 \\ \frac{0.0588 - P_F}{0.0588 - 0.0442} & 0.0442 < P_F < 0.0588 \\ 0 & P_F \geq 0.0588 \end{cases}$$

###### ② 第 II 类 指标 $P_F \in [0.0442 \ 0.0588)$

$$f_2(P_F) = \begin{cases} 0 & P_F \leq 0.0442 \\ \frac{P_F - 0.0442}{0.0588 - 0.0442} & 0.0442 < P_F < 0.0588 \\ 1 & P_F = 0.0588 \\ \frac{0.0881 - P_F}{0.0881 - 0.0588} & 0.0588 < P_F < 0.0881 \\ 0 & P_F \geq 0.0881 \end{cases}$$

③ Ⅲ类 指标  $P_F \in [0.0588, 0.1028]$

$$f_3(P_F) = \begin{cases} 0 & P_F \leq 0.0588 \\ \frac{P_F - 0.0588}{0.0881 - 0.0588} & 0.0588 < P_F < 0.0881 \\ 1 & P_F = 0.0881 \\ \frac{0.1028 - P_F}{0.1028 - 0.0881} & 0.0881 < P_F < 0.1028 \\ 0 & P_F \geq 0.1028 \end{cases}$$

④ Ⅳ类 指标  $P_F \in [0.1028, 1]$

$$f_4(P_F) = \begin{cases} 0 & P_F \leq 0.0881 \\ \frac{P_F - 0.0881}{0.1028 - 0.0881} & 0.0881 < P_F < 0.1028 \\ 1 & P_F \geq 0.1028 \end{cases}$$

据以上各式可以画出阀门失效概率  $P_F$  的白化权函数如图 2 所示。

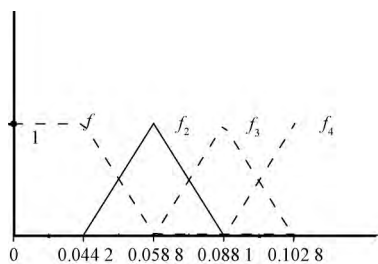


图 2 阀门失效概率  $P_F$  的白化权函数

Fig. 2 Whitening weight function of valve failure probability  $P_F$

2) MTBF

记 MTBF 第 I 类的下限为 84 248 ,第 II 类中限为 68 423 ,第 III 类中限为 47 075 ,第 IV 类上限为 41 552 。则同样可以画出 MTBF 的白化权函数如图 3 所示。

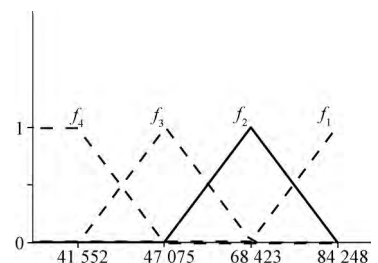


图 3 MTBF 的白化权函数

Fig. 3 Whitening weight function of MTBF

3)  $P_{EF}$

记率  $P_{EF}$  第 I 类的下限为 0.047 8 ,第 II 类中限为 0.062 65 ,第 III 类中限为 0.092 35 ,第 IV 类上限为 0.107 2 。则阀门  $P_{EF}$  的白化权函数如图 4 所示。

(5) 综合评估模型的建立

根据评估指标的点估计值和白化权函数可得,阀门系统的综合评估矩阵为

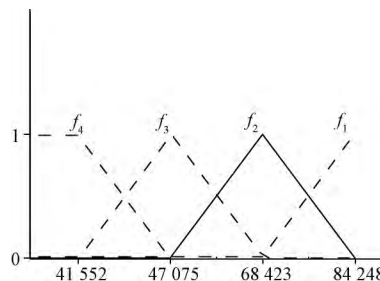


图 4  $P_{EF}$  的白化权函数

Fig. 4 Whitening weight function of  $P_{EF}$

$$R = \begin{pmatrix} 0.5089 & 0 & 0 \\ 0.4911 & 0.5 & 0.3822 \\ 0 & 0.5 & 0.6178 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由式(34)得综合评估模型为

$$B = R\omega^T = \begin{pmatrix} 0.5089 & 0 & 0 \\ 0.4911 & 0.5 & 0.3822 \\ 0 & 0.5 & 0.6178 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.7692 \\ 0.1538 \\ 0.077 \end{pmatrix}$$

最终获得综合评估值为  $B = (0.3914, 0.484, 0.1240)$  据式(35)得评估水平为 0.853 ,与表 3 比较可知该阀门系统可靠性处于“高”水平。

5 结论

本文针对阀门系统提出考虑系统非关键状态影响的多重指标模糊可靠性评价方法。首先综合考虑系统状态转换的累积失效概率及无故障状态转换次数,将系统非关键状态影响等效进概率数据当中。将考虑系统非关键状态影响的失效概率与 MTBF、系统失效概率三个因素作为模糊可靠性评价指标,运用灰色聚类评估方法对阀门系统可靠性进行评估。最终将本文所提计算方法应用在具体工程对象的可靠性评估中。通过分析可知所提方法有以下优点:

- 1) 用该方法对阀门可靠性状态进行评估,克服了常规可靠性模型难以判断可靠性水平处在“完好”到“失效”之间的何种状态的问题。
- 2) 该方法不仅考虑部件关键状态对系统可靠性影响,同时也可以考虑部件非关键状态对系统可靠性的影响,是对传统可靠性计算方法的优化。
- 3) 三重指标的可靠性评估较相较于单一指标的可靠性评估,其结果更为充分。

参考文献(References)

[ 1 ] Mach F , Kurfirt M , Dolezel I. Bistable fully electromagnetic valve for high-speed and fail-safe operations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics , 2017( 99) : 1.

- [ 2 ] Griffith , William S. Optimal reliability modeling: principles and applications [J]. *Technometrics* ,2004 ,46( 1 ) : 112.
- [ 3 ] 刘成龙 ,周金宇 ,邱 睿. 复合材料层合板可靠性分析的发生函数法[J]. *机械工程学报* 2019 ,55( 4 ) : 67-74.  
LIU ChengLong , ZHOU JinYu , QIU Rui. Occurrence function method for reliability analysis of composite laminates [J]. *Journal of Mechanical Engineering* ,2019 ,55( 4 ) : 84-91( In Chinese ) .
- [ 4 ] Amp W S. A study on multi-index comprehensive assessment methods for reliability of overhauled vehicle [ J ]. *Automotive Engineering* ,2004 ,26 ( 1 ) : 107-110.
- [ 5 ] Wang X J , Chen X Y , Yu K. Research on assessment method for the reliability of the urban power grid based on Multi-Model technology [ C ]. *China International Conference on Electricity Distribution* 2010: 1-3.
- [ 6 ] 祝红林. 基于模糊理论的核级蝶阀可靠性与安全性分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学 2011: 25-31.  
ZHU HongLin. Reliability and safety analysis of nuclear grade butterfly valve based on fuzzy theory [ D ]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology ,2011: 25-31 ( In Chinese ) .
- [ 7 ] 梁 芬 ,王 振. 基于 T-S 模糊故障树的焊接机可靠性分析 [J]. *机械强度* 2017 ,39( 3 ) : 592-597.  
LIANG Fen ,WANG Zhen. Reliability analysis of welding machine based on T-S fuzzy fault tree [J]. *Journal of Mechanical Strength* , 2017 ,39( 3 ) : 592-597( In Chinese ) .
- [ 8 ] 马 冬 ,寸立岗 ,柳彦虎 ,等. 圆柱斜齿轮接触疲劳可靠度计算方法改进 [J]. *机械强度* 2018 ,40( 6 ) : 1395-1398.  
MA Dong ,CUN LiGang ,LIU YanHu , et al. Improvement of calculation method for contact fatigue reliability of cylindrical helical gear [J]. *Journal of Mechanical Strength* 2018 ,40( 6 ) : 1395-1398 ( In Chinese ) .
- [ 9 ] Pei Y , Song B F , Han Q. A generic calculation model for aircraft single-hit vulnerability assessment based on equivalent target [J]. *Chinese Journal of Aeronautics* ,2006 ,19( 3 ) : 183-189.
- [10] 裴 扬 ,宋笔锋. 故障树分析的等效失效概率计算方法 [J]. *机械工程学报* ,2007 ,43( 9 ) : 207-210.  
PEI Yang ,SONG BiFeng. Calculation method of equivalent failure probability for fault tree analysis [ J ]. *Journal of Mechanical Engineering* ,2007 ,43( 9 ) : 207-210 ( In Chinese ) .
- [11] 宋述芳 ,吕震宙. 基于马尔可夫链样本模拟的线抽样方法研究 [J]. *机械强度* 2007( 6 ) : 952-955.  
SONG ShuFang ,LV ZhenZhou. Study on line sampling method based on markov chain sample simulation [J]. *Journal of Mechanical Strength* 2007( 6 ) : 952-955( In Chinese ) .
- [12] 石少卿 ,姜节胜. 基于马尔可夫链的系统时变可靠性分析 [J]. *机械强度* ,1998( 3 ) : 31-34.  
SHI ShaoQing ,JIANG JieSheng. A time-varying reliability analysis of systems based on markov chain [ J ]. *Journal of Mechanical Strength* ,1998( 3 ) : 31-34( In Chinese ) .
- [13] 朱晓翠. 基于灰色理论的数控机床可靠性及维修性分析技术 [D]. 长春: 吉林大学 2013: 23-26.  
ZHU XiaoCui. Reliability and maintainability analysis technology of CNC machine tools based on grey theory [ D ]. Changchun: Jilin University ,2013: 23-26 ( In Chinese ) .
- [14] 王悦琴. 核一级电动波纹管截止阀的可靠性分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学 2016: 28-31.  
WANG YueQin. Reliability analysis of nuclear primary electric bellows valve [ D ]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology , 2016: 28-31( In Chinese ) .