

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2024.04.005

# 基于FMECA模糊综合评价法的甲醇燃料风险分析

王建荣<sup>1</sup>, 冯慧华<sup>2</sup>, 李铁<sup>3</sup>

- 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
- 上海船用柴油机研究所, 上海 201108;
- 上海交通大学海洋工程全国重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 针对各种船用替代燃料实船应用的风险, 提出失效模式、后果和严重度分析 (failure modes, effect and criticality analysis, FMECA) 模糊综合评价法, 即将传统的 FMECA 半定量风险评估法转化为定量风险评估, 同时综合考虑各风险因素间的相互影响。将该方法运用于 63 000 t 液货船的甲醇燃料风险评估中, 结果表明甲醇燃料的风险等级为中等, 与实船应用结果相符, 证明该方法可用于船用替代燃料的风险分析。

**关键词:** 能源转型; 船用替代燃料; 甲醇; FMECA 模糊综合风险评价法

**中图分类号:** TK 428.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2024)04-0042-07

## Risk Analysis of Methanol Fuel Based on FMECA Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

WANG Jianrong<sup>1</sup>, FENG Huihua<sup>2</sup>, LI Tie<sup>3</sup>

- School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
- Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China;
- State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In response to the risks associated with on-board application of various marine alternative fuels, a failure mode, effect and criticality analysis (FMECA) fuzzy integrated assessment method is proposed, which transforms the traditional FMECA semi-quantitative risk assessment method into quantitative risk assessment, while comprehensively considering the mutual influence of various risk factors. The method was applied to the risk assessment of methanol fuel on a 63 000 t tanker and the results show that the risk level of methanol fuel is medium, which is in line with the results of the real ship application and proves that the method can be used for the risk analysis of marine alternative fuels.

**Key words:** energy transition; marine alternative fuel; methanol; FMECA fuzzy integrated risk assessment method

## 0 引言

根据《世界能源展望 2022》<sup>[1]</sup> 的研究, 当下应对气候变化所做的努力可能是迈向更清洁和更安

全能源系统的历史性转折, 而转折的关键就是能源转型。为此航运业提出了替代燃料解决方案。与传统燃料相比, 替代燃料因在生产方式、物理特性、安全性、可获得性、存储以及加注等方面

存在差异，对实船应用构成诸多风险。为了识别替代燃料的各风险因素并有效降低风险水平，运用失效模式、后果和严重度分析（failure modes, effect and criticality analysis, FMECA）模糊综合评价法对甲醇燃料在技术、环境、可获得性、政策法规、经济性、管理等6个方面的风险进行评估。

目前，研究人员大量采用FMECA工具对船用替代燃料的存储、船端使用等环节进行风险评估。如ASWIN等<sup>[2]</sup>为了提高风险评估的精度，引入FMECA模糊综合评价理论，并用灰色理论对评估结果进行对比，结果表明FMECA模糊综合评价法精度高、风险优先数（risk priority number, RPN）区分度大，并以常压氨储罐为例验证了该方法的有效性。传统的FMECA分析法在使用过程中存在部分模糊性描述，其评估的结果局限于定性的描述，缺乏客观性，而FMECA模糊综合评价方法是一种定性定量相结合的评价模型，能够较好地弥补FMECA半定量化的局限性，同时也考虑了各风险因素间的相互影响，从而提高了风险评估的有效性和客观性。运用该方法对甲醇燃料进行风险评估，识别出22种风险因素，其中危险3条，通过改进设计、增强控制措施、加强人员培训等方法，把风险等级降低到可以接受的范围内，进一步提高了甲醇燃料的安全性。

## 1 FMECA模糊综合评价法的基本原理

### 1.1 FMECA法

FMECA是从组成单元到系统的“由下而上”的分析方法。FMECA通过专家打分和“头脑风暴”等手段识别出系统故障发生的前因后果，估计故障事件发生的频度、严重度以及分析故障的可探测度，进而计算出风险优先数（ $Y_{RPN}$ ）=发生频度（ $O$ ）×影响严重度（ $S$ ）×可检测性（ $D$ ），并根据风险优先数对故障模式进行排序、制定相应的风险控制措施，以降低系统风险水平，提高系统的安全性。

### 1.2 模糊综合评价法

模糊综合评价基本原理<sup>[3]</sup>：首先确定待评价对象的因素集和评价集，确定各因素权重和隶属度向量，然后构建模糊评判矩阵，最后将模糊评判矩阵与评价对应的权重向量进行模糊运算，即可获得最终的评价结果。其数学模型分为一级综合评价和多级综合评价。

#### 1.2.1 一级模糊评价模型

该评价模型主要包含6个步骤：

#### ① 建立评价因素集

邀请有关方面的专家，成立一个专家评判小组，通过讨论确定系统评价因素集  $U_n = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ （其中， $u_i$ 表示评价因素， $i = 1, 2, \dots, n$ ）。

#### ② 建立评价尺度集（评语集）

尺度集是评价者对评价对象可能做出的各种总的评价结果组成的集合，即  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ （其中  $v_j$ 代表各种可能的评价结果， $j = 1, 2, \dots, n$ ）。

#### ③ 确定各评价因素的权重集

为了反映各因素的重要程度，对各个因素  $u_i$ 应赋予一个相应的权数  $a_i$ （ $i = 1, 2, \dots, n$ ）。由各权数所组成的集合称为因素权重集，即  $\omega = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ （ $\sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i \geq 0$ ）。常用的确定权重的方法有统计实验法、分析推理法、专家评分法、层次分析法等。以下采用层次分析法确定权重。为了计算方便，根据层次分析法原理，运用MATLAB软件编制层次分析法程序如下：

```
clc, clear
disp('输入判断矩阵');
A=input('A=');
[n, n] = size(A);
x = ones(n, 100);
y = ones(n, 100);
m = zeros(1, 100);
m(1) = max(x(:, 1));
y(:, 1) = x(:, 1);
x(:, 2) = A*y(:, 1);
m(2) = max(x(:, 2));
y(:, 2) = x(:, 2)/m(2);
p=0.0001; i=2; k=abs(m(2)-m(1));
while k>p
i=i+1;
x(:, i) = A*y(:, i-1);
m(i) = max(x(:, i));
y(:, i) = x(:, i)/m(i);
k = abs(m(i)-m(i-1));
end
a = sum(y(:, i));
w = y(:, i)/a;
t = m(i);
disp('权向量:'); disp(w);
disp('最大特征值:'); disp(t);
% 以下是一致性检验
CI = (t-n)/(n-1)
```

```

RI = [0 0 0.52 0.89 1.12 1.26 1.36 1.41
1.46 1.49 1.52 1.54 1.56 1.58 1.59];

```

```

CR = CI / RI (n) ; % 计算一致性

```

```

if CR < 0.10

```

```

disp ('此矩阵的一致性可以接受! ');

```

```

disp ('CI = '); disp (CI) ;

```

```

disp ('CR = '); disp (CR) ;

```

```

else

```

```

disp ('此矩阵的一致性不可以接受! ');

```

```

end

```

④ 找出单因素评判矩阵  $R$

对因素集内诸因素的评定是一种模糊映射，即是对单因素的评定。由于不同专家做出的评定不同，所以描述考核的结果只能用对  $u_i$  做出  $v_j$  评定的可能性大小来表示，这种可能的程度称为隶属度，记作  $r_{ij}$ 。  $r_{ij}$  是指多个评价主体对某个评价对象在  $u_i$  方面做出  $v_j$  评定的可能性大小，这样可以得到某个单因素的评价集：

$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ ，从而获得因素集的综合评价矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

⑤ 进行一级模糊综合评价

$$B = \omega \times R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (2)$$

式中： $b_j$ 为一级模糊综合评价指标，即综合考虑所有因素的影响时评价因素对评语集中第  $j$  个元素的隶属度，其中  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

⑥ 计算综合评价值

将模糊评语量化为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ，则该评价对象的综合评价值为  $P = (b_1, b_2, \dots, b_m) \times (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ ，即将综合评价结果  $B$  转化为综合分值，依据其分值大小进行排序，从而直观反映评价结果，为决策者提供信息。

1.2.2 多级模糊评价模型

将因素集  $U$  按属性的类型划分为  $S$  个子集，记作  $U_1, U_2, \dots, U_s$ ，根据需要，每一个子集还可以进一步划分。对每一个子集  $U_i$ ，按一级评价模型进行评价。将每一个  $U_i$  作为一个因素，用  $B_i$  作为他的单因素评价集，又可构成评价矩阵  $R = [B_1, B_2, \dots, B_s]^T$ ，获得二级综合评价： $B = A \times R$ 。

1.3 FMECA 模糊综合评价法基本流程

FMECA 模糊综合评价法是将 FMECA 理论和模糊综合评价法相结合的方法。该方法一方面克服了 FMECA 在风险评价中存在的模糊性描述、评价指标难以量化的问题，另一方面对模糊综合评价中指标权重偏主观性的缺点进行了优化，是一种定性定量相结合的风险评估方法，使评价结果更加合理。FMECA 模糊综合评价法的基本流程，如图 1 所示，主要包含以下步骤。

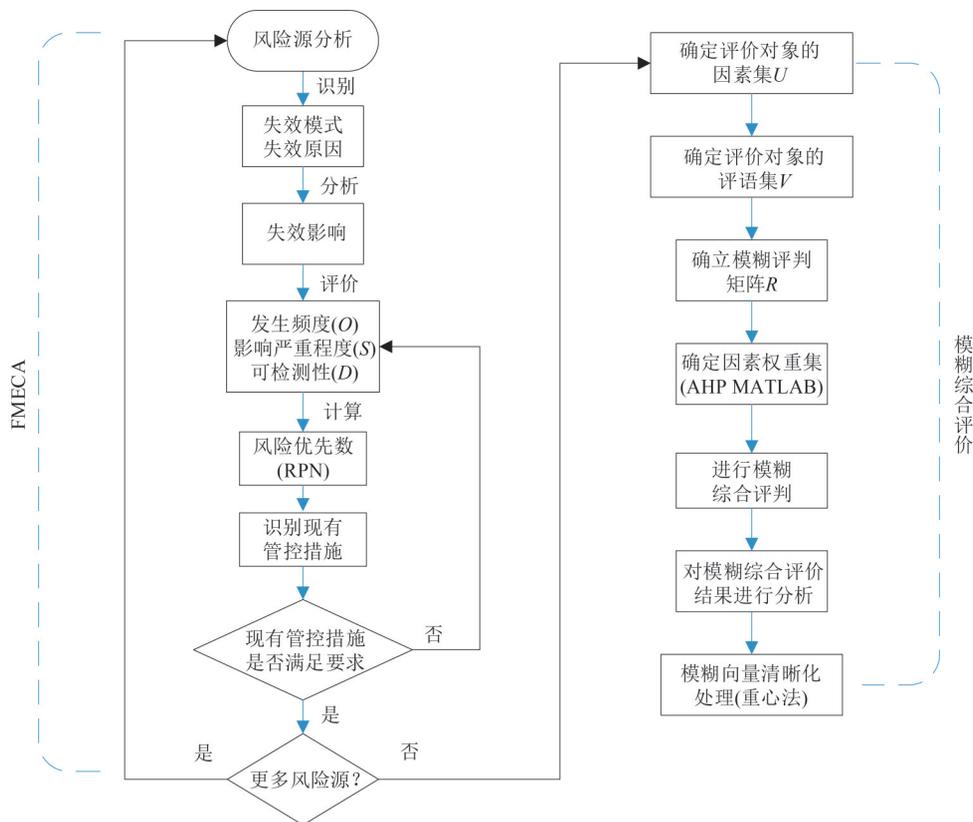


图1 FMECA 模糊综合评价法基本流程图

(1) 风险源识别。确定风险分析目标层、识别各个风险源及风险因素。

(2) 制定FMECA表。首先成立风险分析专家组，再依据头脑风暴法识别出每个风险源的失效模式、失效原因及影响等，并评估其初始风险是否满足可接受的准则，形成FMECA表。

(3) 指标权重计算。依据层次分析法原理，运用MATLAB软件编制层次分析法程序并计算指标权重。

(4) 计算风险优先数以及风险优先数等级划分。

(5) 模糊综合评价。

(6) 制定风险控制措施。根据风险矩阵等级的划分，确定相应的风险控制措施。

## 2 工程案例

### 2.1 工程概况

选取63 000 t液货船(如图2)为研究对象，其船舶信息如表1所示。

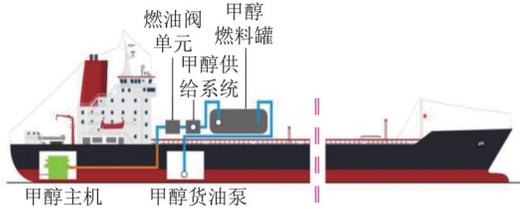


图2 63 000 t液货船的甲醇燃料系统示意图

表1 船舶主要参数

项目	参数
总长/m	199.9
船宽/m	32.26
型深/m	19
结构吃水/m	13.4
主机功率/kW	10 320
主机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	100
甲醇燃料/m <sup>3</sup>	2 000
柴油/m <sup>3</sup>	1 460
轻柴油/m <sup>3</sup>	200
甲醇耗量/(t·d <sup>-1</sup> )	47.6
柴油耗量/(t·d <sup>-1</sup> )	23.8

### 2.2 甲醇燃料系统FMECA分析

#### 2.2.1 甲醇燃料系统风险识别

以甲醇燃料的风险评估为目标层，从技术、环境、可获得性、政策法规、经济性、管理等6个方面识别主要风险因素，详见图3。图3中“IGF规则”全称为国际使用气体或其他低闪点燃料船舶安全规则(International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels)；“SOLAS”为国际海上人命安全公约(International Convention for the Safety of Life at Sea)；IACS为国际船级社协会(International Association of Classification Society)；“SEC区”指硫氧化物排放控制区域(SO<sub>x</sub> Emission Control Area)。

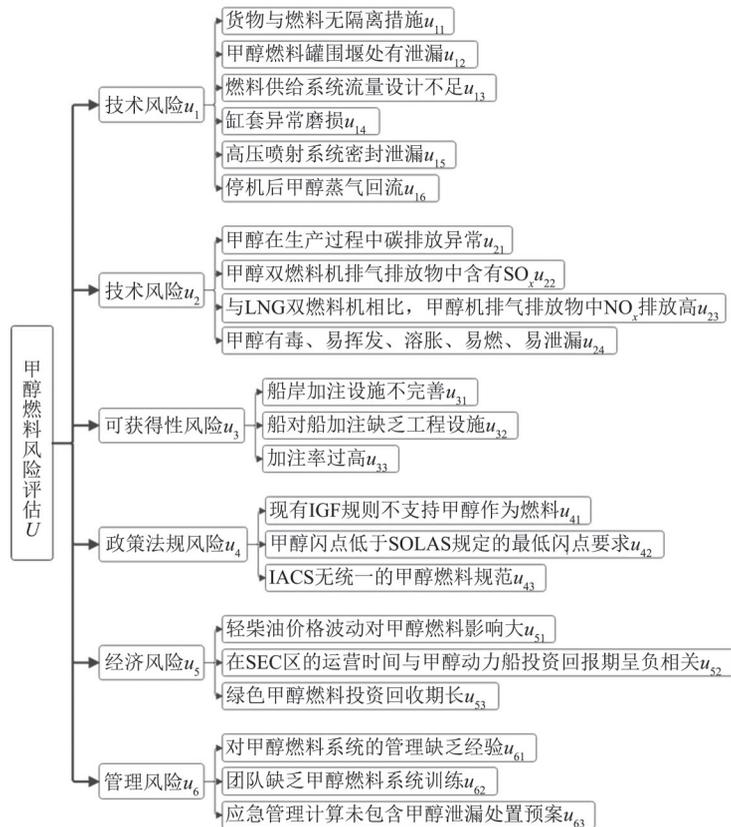


图3 63 000 t液货船的甲醇燃料系统主要风险源及风险因素

### 2.2.2 制定FMECA表格

以技术风险  $u_1$  为例, 对甲醇燃料在设计方面存在的失效模式、失效原因以及失效影响进行分

析, 并邀请专家根据经验对其风险发生频度、影响严重程度以及可检测性等进行打分, 详见表2, 评分准则见表3。

表2 甲醇燃料系统部分指标FMECA专家评分表

序号	失效模式	失效原因	失效影响	发生频度 (O)	影响严重程度 (S)	可检测性 (D)
$u_{11}$	货物与燃料无隔离措施	燃料罐与货油舱相邻	燃料与货油相互污染	频繁、很可能、有时、极少、不可能	灾难、严重、中等、轻微、无影响	完全无法检测、不经测试无法检测、在检查时可发现、前期检查可发现、可直接发现
$u_{12}$	甲醇燃料罐围堰处有泄漏	甲醇燃料罐底部围堰处无有效的探测装置	有毒气体集聚、腐蚀、爆炸风险	频繁、很可能、有时、极少、不可能	灾难、严重、中等、轻微、无影响	完全无法检测、不经测试无法检测、在检查时可发现、前期检查可发现、可直接发现

表3 甲醇燃料系统部分指标FMECA专家评分准则

评分准则	发生频度 (O)	影响严重程度 (S)	可检测性 (D)
5	频繁 (>0.3)	灾难	完全无法检测
4	很可能 (0.05~0.3)	严重	不经测试无法检测
3	有时 (0.005~0.050)	中等	在检查时可发现
2	极少 (0.0005~0.0050)	轻微	前期检查可发现
1	不可能 (<0.0005)	无影响	可直接发现

### 2.2.3 失效评估

邀请1~2位专家根据表3评分准则对各风险因

素进行评分, 计算风险优先数, 以技术风险各失效模式为例, 见表4。

表4 甲醇燃料系统部分失效评估表

序号	失效模式	发生频度 (O)	影响严重程度 (S)	可检测性 (D)	风险优先数 ( $Y_{RPN}$ )	评价等级
$u_{11}$	货物与燃料无隔离措施	2	4	1	8	很安全
$u_{12}$	甲醇燃料罐围堰处有泄漏	2	4	4	32	安全
$u_{13}$	燃料供给系统流量设计不足	2	3	1	6	很安全
$u_{14}$	缸套异常磨损	3	3	4	36	安全
$u_{15}$	高压喷射系统密封泄漏	2	3	4	24	安全
$u_{16}$	停机后甲醇蒸气回流	2	2	4	16	很安全

### 2.2.4 风险等级划分及分析

风险等级划分, 见表5。

表5 风险优先数等级划分表

风险优先数 ( $Y_{RPN}$ )	0~20	21~50	51~80	81~100	101~125
评价等级	很安全	安全	中等	危险	很危险

上述FMECA分析法在使用过程中存在部分模糊性描述, 其评估的结果局限于定性的描述, 同时也未考虑各风险因素间的相互影响, 从而使得评估结果缺乏客观性。为此, 以下在考虑各风险因素间的权重系数的同时, 运用模糊综合评价法量化FMECA分析结果, 使得风险评估结果更加合理。

### 2.3 AHP法评价风险因素的权重

运用上述MATLAB程序计算甲醇燃料风险评估的判断矩阵、最大特征值、一致性检验, 结果详见表6~表12。

表6 主要风险源U的判断矩阵及权重

U	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$\omega_0$
$u_1$	1	2	3	4	5	6	0.3825
$u_2$	1/2	1	2	3	4	5	0.2504
$u_3$	1/3	1/2	1	2	3	4	0.1596
$u_4$	1/4	1/3	1/2	1	2	3	0.1006
$u_5$	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0.0641
$u_6$	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.0428

注: 矩阵的最大特征值  $\lambda_{max}=6.1225$ , 计算一致性比例  $CR=0.0194 < 0.1$ 。

表7 技术风险的判断矩阵及权重

$u_1$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$	$u_{15}$	$u_{16}$	$\omega_1$
$u_{11}$	1	1/4	1/2	1/3	1/6	1/5	0.0477
$u_{12}$	4	1	2	4/3	2/3	4/5	0.1907
$u_{13}$	2	1/2	1	1	1/3	2/5	0.1028
$u_{14}$	3	3/4	1	1	1/2	3/5	0.1345
$u_{15}$	6	3/2	3	2	1	6/5	0.2860
$u_{16}$	5	5/4	5/2	5/3	5/6	1	0.2384

注:  $\lambda_{max}=6.0184$ ,  $CR=0.0029 < 0.1$ 。

表8 环境风险的判断矩阵及权重

$u_2$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$u_{24}$	$\omega_2$
$u_{21}$	1	4	2	2	0.4375
$u_{22}$	1/4	1	1/3	1/2	0.0983
$u_{23}$	1/2	3	1	3/2	0.2676
$u_{24}$	1/2	2	2/3	1	0.1966

注： $\lambda_{\max} = 4.0206$ ,  $CR = 0.0077 < 0.1$ 。

表9 可获得性风险的判断矩阵及权重

$u_3$	$u_{31}$	$u_{32}$	$u_{33}$	$\omega_3$
$u_{31}$	1	1/5	1/4	0.0992
$u_{32}$	5	1	3/2	0.5272
$u_{33}$	4	2/3	1	0.3735

注： $\lambda_{\max} = 3.0037$ ,  $CR = 0.0036 < 0.1$ 。

表10  $u_4$ 判断矩阵及权重

$u_4$	$u_{41}$	$u_{42}$	$u_{43}$	$\omega_4$
$u_{41}$	1	1/2	2	0.2970
$u_{42}$	2	1	3	0.5396
$u_{43}$	1/2	1/3	1	0.1634

注： $\lambda_{\max} = 3.0092$ ,  $CR = 0.0088 < 0.1$ 。

表11  $u_5$ 判断矩阵及权重

$u_5$	$u_{51}$	$u_{52}$	$u_{53}$	$\omega_5$
$u_{51}$	1	4/3	5	0.5231
$u_{52}$	3/4	1	3	0.3642
$u_{53}$	1/5	1/3	1	0.1127

注： $\lambda_{\max} = 3.0055$ ,  $CR = 0.0053 < 0.1$ 。

表12  $u_6$ 判断矩阵及权重

$u_6$	$u_{61}$	$u_{62}$	$u_{63}$	$\omega_6$
$u_{61}$	1	1/3	1/4	0.1220
$u_{62}$	3	1	1/2	0.3196
$u_{63}$	4	2	1	0.5584

注： $\lambda_{\max} = 3.0183$ ,  $CR = 0.0176 < 0.1$ 。

## 2.4 模糊综合评价

风险因素集  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}, u_{21}, \dots, u_{62}, u_{63}\}$

风险评价集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{严重}, \text{较高}, \text{一般}, \text{较小}, \text{轻微}\}$

### 2.4.1 一级模糊评判

邀请15名专家根据风险评价集V,对风险因素U做出评价,以技术风险 $u_1$ 为例,结果详见表13所示。

表13经归一化处理,根据式(1)分别得到各风险源隶属度矩阵。

表13 风险评判表

序号	严重	较高	一般	较小	轻微
$u_{11}$	0	1	6	6	2
$u_{12}$	1	4	8	2	0
$u_{13}$	0	1	8	6	0
$u_{14}$	1	6	7	1	0
$u_{15}$	6	7	2	0	0
$u_{16}$	1	8	6	0	0

以技术风险 $u_1$ 隶属度矩阵 $R_1$ 为例:

$$R_1 = \begin{matrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \\ u_{14} \\ u_{15} \\ u_{16} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.07 & 0.40 & 0.40 & 0.13 \\ 0.07 & 0.27 & 0.53 & 0.13 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0.53 & 0.40 & 0 \\ 0.07 & 0.40 & 0.47 & 0.07 & 0 \\ 0.40 & 0.47 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0.07 & 0.53 & 0.40 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理可得,  $u_2 \sim u_6$ 隶属度矩阵 $R_2 \sim R_6$ 。

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.53 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0.00 & 0.80 & 0.20 & 0 \\ 0.07 & 0.40 & 0.47 & 0.07 & 0 \\ 0.13 & 0.40 & 0.40 & 0.07 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.47 & 0.47 & 0.07 & 0 \\ 0.07 & 0.40 & 0.53 & 0.00 & 0 \\ 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.07 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.27 & 0.60 & 0.07 & 0 \\ 0.13 & 0.33 & 0.33 & 0.20 & 0 \\ 0.07 & 0.20 & 0.40 & 0.33 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.33 & 0.53 & 0.07 & 0 \\ 0.07 & 0.40 & 0.40 & 0.13 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0.53 & 0.40 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.53 & 0.27 & 0 \\ 0.07 & 0.20 & 0.47 & 0.20 & 0.07 \\ 0.20 & 0.33 & 0.33 & 0.13 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(2)进行一级模糊综合评价:

$$B_1 = \omega_1 \times R_1 = (0.0477, 0.1907, 0.1028, 0.1345, 0.2860, 0.2384)$$

$$\begin{matrix} \times \\ \begin{bmatrix} 0 & 0.07 & 0.40 & 0.40 & 0.13 \\ 0 & 0.27 & 0.53 & 0.13 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0.53 & 0.40 & 0 \\ 0.07 & 0.40 & 0.47 & 0.07 & 0 \\ 0.40 & 0.47 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0.07 & 0.53 & 0.40 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} = (0.1539, 0.3767, 0.3705, 0.0944, 0.0062)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= \omega_2 \times R_2 = (0.0441, 0.2732, 0.5155, 0.1673, 0) \\ B_3 &= (0.1098, 0.3817, 0.4769, 0.0315, 0) \\ B_4 &= (0.1026, 0.2917, 0.4234, 0.1822, 0) \\ B_5 &= (0.0592, 0.3276, 0.4848, 0.1285, 0) \end{aligned}$$

$B_6=(0.133\ 0, 0.274\ 5, 0.400\ 3, 0.170\ 9, 0.021\ 3)$

根据最大隶属度原则, 可以得出:  $B_1 \in v_2$ , 风险较高;  $B_2 \in v_3$ , 风险一般;  $B_3 \in v_3$ , 风险一般;  $B_4 \in v_3$ , 风险一般;  $B_5 \in v_3$ , 风险一般;  $B_6 \in v_3$ , 风险一般。

### 2.4.2 二级模糊评判

根据一级模糊评判的结果  $B_1 \sim B_6$ , 构成二级模糊评判隶属度矩阵  $R=[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6]^T$ , 则二级模糊评判矩阵  $P$  为:

$$\begin{aligned}
 P &= \omega_0 \times R \\
 &= \omega_0 \times (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6)^T \\
 &= (0.382\ 5, 0.250\ 4, 0.159\ 6, 0.100\ 6, \\
 &\quad 0.064\ 1, 0.042\ 8) \\
 &\times \begin{bmatrix} 0.153\ 9 & 0.376\ 7 & 0.370\ 5 & 0.094\ 4 & 0.006\ 2 \\ 0.044\ 1 & 0.273\ 2 & 0.515\ 5 & 0.167\ 3 & 0 \\ 0.109\ 8 & 0.381\ 7 & 0.476\ 9 & 0.031\ 5 & 0 \\ 0.102\ 6 & 0.291\ 7 & 0.423\ 4 & 0.182\ 2 & 0 \\ 0.059\ 2 & 0.327\ 6 & 0.484\ 8 & 0.128\ 5 & 0 \\ 0.133\ 0 & 0.274\ 5 & 0.400\ 3 & 0.170\ 9 & 0.021\ 3 \end{bmatrix} \\
 &= (0.107\ 2, 0.335\ 5, 0.437\ 7, 0.116\ 9, 0.003\ 3)
 \end{aligned}$$

### 2.4.3 模糊向量清晰化处理

模糊综合评价方法的结果是模糊向量, 为了直观地评判风险等级, 须要对向量进行清晰化处理。常用的清晰化方法为重心法<sup>[4]</sup>, 即加权平均法, 计算公式如下:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(v_i) \times v_i}{\sum_{i=1}^n \mu(v_i)} \quad (3)$$

式中:  $\mu(v_i)$  为加权系数;  $v_i$  代表评价值 (见表14), 取组中值。

表14 风险评价等级

评价值 $v_i$	$0 \leq v_i \leq 20$	$21 \leq v_i \leq 50$	$51 \leq v_i \leq 80$	$81 \leq v_i \leq 100$	$101 \leq v_i \leq 125$
评价等级	很安全	安全	中等	危险	很危险
组中值	10.0	35.5	65.5	90.5	113

根据式(3), 模糊评判结果清晰化处理后得到  $M=75.3$ , 对照风险评价等级表14, 可知甲醇燃料系统的总体风险等级为中等。同理可知每个风险因素的评价等级, 其中  $u_{15}$ 、 $u_{16}$ 、 $u_{33}$  风险等级分别为96.2、82.0和81.3, 评定为危险, 需要提出相应的应对措施。现有措施经改进后, 风险评价等级为安全, 见表15所示。

表15 改进后的风险评价等级

序号	失效模式	现有控制措施	改进措施	改进后的风险等级				
				发生频度 (O)	影响严重程度 (S)	可检测性 (D)	风险优先数 ( $Y_{RPN}$ )	风险评价等级
$u_{15}$	高压喷射系统密封泄漏	泄漏检测报警	增压阀设置独立冷却系统和密封单元	2	2	3	12	安全
$u_{16}$	停机后甲醇蒸气回流	探测吹扫气体, 有甲醇泄漏报警	调整吹扫时间, 设置吹扫监测与发动机启动联锁装置	2	2	1	4	安全
$u_{33}$	加注率过高	手动控制加注速度	增加燃料罐高位报警、高高位停止加注措施、增加加注实时反馈措施、加强人员培训	2	2	2	8	安全

## 3 结论

(1) 通过构建定性与定量相结合的FMECA模糊综合评价法, 一方面克服了传统FMECA风险分析法在使用过程中存在评估结果局限于定性描述、缺乏客观性的问题, 另一方面可运用层次分析法对各风险因素进行权重的分析和分配, 从而提高风险评估的有效性和客观性。

(2) 以63 000 t液货船的甲醇燃料风险评估为例, 运用FMECA模糊综合评价法对甲醇燃料系统进行风险评估, 参考航运业替代燃料风险评估等级的划分原则, 从6个主要风险源角度出发, 首先识别出22种风险因素, 通过FMECA分析法得出各

风险因素的风险等级。根据模糊综合评价法计算各风险因素和风险源的评价结果矩阵, 再将评价结果通过权重分配和归一化处理转为模糊向量, 最后将模糊向量通过清晰化处理转化为评价值, 可直观反映评判风险等级。通过该评价法, 识别出3条风险因素为危险等级, 经过改进设计、增强控制措施、加强人员培训等方法, 把风险等级降低到可以接受的范围内, 进一步提高了甲醇燃料系统的安全性。

(3) 通过FMECA模糊综合评价法对甲醇燃料的风险进行评估, 为其他替代燃料(如氢燃料、氨燃料等)的风险评估提供借鉴。

(下转第60页)