doi:10.3969/j.issn.1005-3158.2014.03.011

多层次灰色评价法对 FPSO 船火灾风险的评估*

郑运虎 姜峰

(兰州理工大学石油化工学院)

摘 要 针对浮式生产、储油、卸油船(FPSO 船)在多层次、多变量和多种非定量因素影响下缺乏有效定量评估火灾风险手段的情况,采用多层次灰色综合安全评价法,构建火灾风险评价指标体系,对 FPSO 船进行火灾风险评估。在计算过程中结合层次分析法,确定各层指标对应的权重,将风险影响程度进行定量化处理,最终确定评价体系整体安全性良好。多层次灰色评估方法针对少数据、小样本、信息不完全和经验缺乏的不确定性问题具有计算简便、科学、准确和实用的特点,可为 FPSO 船在火灾风险安全评估方面提供一定的依据。

关键词 层次分析法; 多层次灰色评价; 白化函数; 权重; FPSO; 火灾

文章编号: 1005-3158(2014)03-0034-04

0 引 言

FPSO(Floading Production Storage & Offloading)为浮式生产、储油、卸油船,是一种在海上单点系泊没有动力的船,通常与钻油平台或海底采油系统组成一个完整的采油、原油处理、储油和卸油系统[1]。随着 FPSO 建造技术的快速发展,FPSO 船体越来越大,油气处理和储运功能增强,油气周转周期缩短,处理成本降低,经济效益和社会效益越来越显著。但是油气集输和处理流程复杂、处理量大、中间环节多,加之油气为易燃、易爆物,容易发生火灾、爆炸等严重事故。因此,针对 FPSO 船的实际运营情况,构建火灾风险评价指标体系,建立多层次灰色综合安全评价模型,对 FPSO 进行火灾风险评估很有必要;对提高油气处理和储运作业安全、减少人员伤亡、预防环境污染等意义重大[2]。

1 多层次灰色评价理论

将评价系统分为三个层次[3],则各个层次代表的含义可表示为:A 代表综合评价值;B 代表一级指标;B_i 为二级指标。记 $B=\{B_1,B_2,\cdots,B_m\}$;$B_i=\{B_{i1},B_{i2},\cdots,B_{ij}\}$。其中,$B_i$ 为 B 的子集,B_{ij} 为 B_i 的子集,m 为一级指标的数量,j 为 B 中第 i 个指标所包含的指标个数。

多层次灰色综合评价[3-7]的具体步骤如下:

◆ 理清各个指标层次,建立评价指标模型。

◆ 制定二级指标 B_{ij} 的评分等级与评分标准。通过给定性评价指标打分,将定性指标转化为定量指标。

◆ 确定评价指标 B_i 与 B_{ij} 的权重。采用层次分析法确定 B_{ij} 的与 B_i 的权重向量分别为 $W_i=\{w_{i1},w_{i2},\cdots,w_{ij}\}$ 和 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_m\}$。

◆ 组织评价者按制定的评分标准评分并建立评价样本矩阵 D。设评价者序号为 k(k=1,2…,p),设第 k 个评价者对评价指标 B_{ij} 的评分 d_{ijk},则评价样本矩阵 $D=(d_{ijk})_{uij\times p}$。

◆ 确定评价灰类。确定评价灰类就是要确定评价灰类的等级、灰类的灰数以及白化权函数等,设评价灰类序号为 e(e=1,2,…,g)即有 g 个灰类等级,若将评价灰类取为"优""良""中""差"四级,则 g=4。第一灰类 e=1,灰数 $\bar{1}\in[d,\infty]$,白化权函数为 f_1;第二灰类 e=2,灰数 $\bar{2}\in[0,d_2,2d_2]$,白化权函数为 f_2;第三灰类 e=3,灰数 $\bar{3}\in[0,d_3,2d_3]$,白化权函数为 f_3。第四灰类 e=4,灰数 $\bar{4}\in[0,d_4,2d_4]$,白化权函数为 f_4。

◆ 确定灰色评价系数。对指标 B_{ij} 属于第 e 个评价灰类的灰色评价系数为

$$X_{ije}=\sum_{k=1}^{p}f_e(d_{ijk})$$

则属于各个评价灰类的总灰色评价系数为

$$X_{ij}=\sum_{e=1}^{g}X_{ije}$$

◆ 计算灰色评价权向量及权矩阵。评价者就指标 B_{ij} 属于第 e 个灰类的灰色评价权为

$$r_{ije}=\frac{X_{ije}}{r_{ij}}$$

* 基金项目:国家质检公益项目(201210026,201310152);甘肃省财政厅高校基本科研项目。

郑运虎,兰州理工大学石油化工学院安全工程专业在读硕士。通信地址:甘肃省兰州市兰州理工大学西校区石油化工学院研究生院,730050

则 B_{ij} 对于各评价灰类的灰色评价权向量 $r_{ij}=\{r_{ij1},r_{ij2}\cdots,r_{ijg}\}$。将隶属于 B_i 的各类 B_{ij} 指标所对应的灰类灰色评价权向量综合后得综合评价矩阵 R_i。

$$R_i=\begin{bmatrix} r_{i1} \\ r_{i2} \\ \vdots \\ r_{ij} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1g} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \cdots & r_{ijg} \end{bmatrix}$$

◆ 对 B_i 和 B 作综合评价。指标 B_i 作综合评价

$$B_i=W_i\cdot R_i=(b_{i1},b_{i2},\cdots b_{ig})$$

根据 L_i 得到指标 B_i 各评价灰类的灰色评价矩阵 R：

$$R=\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1g} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mg} \end{bmatrix}$$

由 R 进一步得出受评项目 B 的综合评价结果向量：$B=W\cdot R=(b_1,b_2,\cdots b_g)$。

◆ 计算综合评价值。由于综合评价结果 B 是一个向量，在实际应用中应单值化。将各个灰类等级按"灰水平"赋值，得到各评价灰类等值化向量 $C=(C_1,C_2,\cdots,C_g)$，进而得出受评项目的综合评价值 $A=B\cdot C^T$。

2　多层次灰色评价法应用实例

◆ 收集整理风险因素，建立评价指标模型。某 FPSO 火灾风险因素评估体系由个人素质、设备状况、安全管理和环境因素四大部分以及各指标对应附属因素组成，具体评价内容见图 1。

◆ 制定 B_{ij} 的评分等级与评分标准。将评价元素按不同的标准划分为 4 个级别，8 个评分标准，实行 5 分制。以分数 4，3，2，1 为界建立 4 个评价级别，对应于评价灰类等级为"优""良""中""差"。介于相邻级别之间的评分标准为 4.5，3.5，2.5 和 1.5。

◆ 确定评价指标的权重。为减少主观因素的影响，利用 AHP 法计算各层次评价指标权重。AHP 法是把复杂问题中各因素划分成相关联的有序层次，使之条理化。根据一定客观的判断，对每一层次中每两元素相对重要性给出定量表示，确定全部元素的权重。大致步骤如下：①理清层次并建立递阶层次结构图，见图 1；②构造判断矩阵并按表 1 规则进行评分并求出判断矩阵的最大特征根，找出与最大特征根相对应的特征向量，特征向量即为同一层各因素相当于上一层某因素相对重要性的排序权重；③进行层次排序与一致性检验。以第一层评价指标为例，计算评价指标 $B_i(i=1,\cdots,5)$ 权重向量如下：

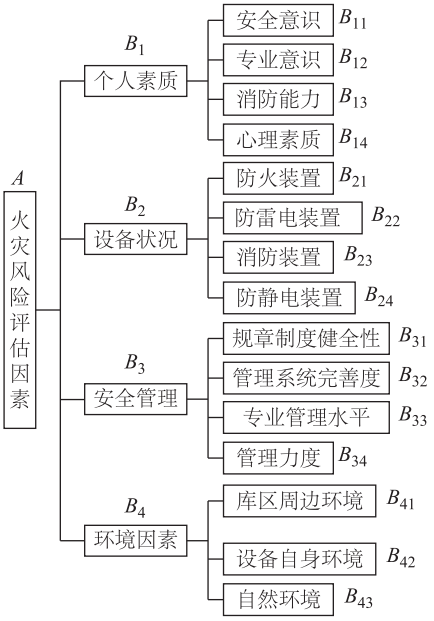

图 1　火灾风险因素评估模型

$$\begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ B_1 & 1 & 1/3 & 1 & 5 \\ B_2 & 3 & 1 & 4 & 6 \\ B_3 & 1 & 1/4 & 1 & 4 \\ B_4 & 1/5 & 1/6 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W=[0.209\ 6,0.548\ 3,0.184\ 6,0.057\ 5]$$

$$RI=0.9;CI=0.04\ 098$$

$CR=0.0\ 455<0.1$，通过一致性检验。

同理可得 B_{ij} 权重向量：

$W_1=(0.2\ 857,0.254,0.2\ 698,0.1\ 905)$

$W_2=(0.2\ 333,0.2\ 333,0.3\ 001,0.2\ 333)$

$W_3=(0.25,0.2\ 353,0.3\ 001,0.2\ 333)$

$W_4=(0.383,0.3\ 617,0.2\ 553)$

◆ 建立评价样本矩阵，组织 5 位经验丰富的专业人士按照评分标准进行评分，求得样本矩阵 D。

$$D=\begin{bmatrix} 4.0 & 4.0 & 4.0 & 3.5 & 3.5 \\ 4.0 & 3.5 & 4.5 & 4.5 & 4.0 \\ 4.0 & 3.5 & 4.0 & 4.5 & 3.5 \\ 3.5 & 4.0 & 4.0 & 4.0 & 3.5 \\ 4.0 & 4.5 & 3.5 & 4.0 & 4.0 \\ 4.0 & 3.5 & 4.5 & 3.5 & 3.5 \\ 3.5 & 4.5 & 4.5 & 3.5 & 3.5 \\ 3.5 & 4.0 & 4.0 & 4.0 & 3.0 \\ 4.0 & 4.0 & 4.0 & 4.0 & 3.5 \\ 3.5 & 3.5 & 4.0 & 3.5 & 3.0 \\ 4.5 & 3.5 & 4.0 & 3.0 & 4.0 \\ 4.0 & 4.5 & 4.0 & 4.5 & 3.5 \\ 4.0 & 3.5 & 4.0 & 4.0 & 4.5 \\ 4.0 & 3.5 & 4.5 & 3.0 & 3.5 \\ 3.5 & 4.0 & 3.5 & 3.0 & 3.5 \end{bmatrix}$$

◆ 确定评价灰类。按“优”“良”“中”“差”，设定四个评价灰类，其相应的灰数及白化权函数如下：第一灰类“优”(e=1)，设定灰数 $\bar{1}\in[0,4,\infty]$，白化权函数为 $f_1(d_{ijk})$；第二灰类“良”(e=2)，灰数 $\bar{2}\in[0,3,6]$白化权函数为 $f_2(d_{ijk})$；第三灰类“中”(e=3)，灰数 $\bar{3}\in[0,2,4]$白化权函数为 $f_3(d_{ijk})$；第四灰类“差”(e=4)，灰数 $\bar{4}\in[0,1,2]$；白化权函数为 $f_4(d_{ijk})$。

第一灰类(e=1)，白化权函数为：

$$f_1(d_{ijk})=\begin{cases}\dfrac{d_{ijk}}{4}; & d_{ijk}\in[0,4]\\ 1; & d_{ijk}\in[4,\infty]\\ 0; & d_{ijk}\notin[\infty,\infty]\end{cases}$$

第二灰类(e=2)；白化权函数为：

$$f_2(d_{ijk})=\begin{cases}\dfrac{d_{ijk}}{3}; & d_{ijk}\in[0,3]\\ \dfrac{(6-d_{ijk})}{3}; & d_{ijk}\in[3,\infty]\\ 0; & d_{ijk}\notin[0,6]\end{cases}$$

第三灰类(e=3)；白化权函数为：

$$f_3(d_{ijk})=\begin{cases}\dfrac{d_{ijk}}{2}; & d_{ijk}\in[0,2]\\ \dfrac{(4-d_{ijk})}{3}; & d_{ijk}\in[2,4]\\ 0; & d_{ijk}\notin[0,4]\end{cases}$$

第四灰类(e=4)；白化权函数为：

$$f_4(d_{ijk})=\begin{cases}1; & d_{ijk}\in[0,1]\\ 2-d_{ijk}; & d_{ijk}\in[2,4]\\ 0; & d_{ijk}\notin[0,4]\end{cases}$$

◆ 确定灰色评价系数

对于指标 B_{11}属于第 e 个评价灰类的灰色评价系数为 X_{11e}，则：e=1，$X_{111}=\sum_{k=1}^{5}f_1(d_{11k})$；

e=2，$X_{112}=\sum_{k=1}^{5}f_2(d_{11k})$；

e=3，$X_{113}=\sum_{k=1}^{5}f_3(d_{11k})$；

e=4，$X_{114}=\sum_{k=1}^{5}f_4(d_{11k})$

对于指标 B_{11}属于各个评价灰类的总灰色评价系数为 X_{11}，则：

$$X_{11}=\sum_{e=1}^{4}X_{11e}$$

◆ 计算灰色评价权向量及权矩阵。所有专家就评价指标 B_{11}属于各灰类的灰色评价权向量为 r_{11e}，则：

e=1，$r_{111}=X_{111}/X_{11}$；

e=2，$r_{112}=X_{112}/X_{11}$；

e=3，$r_{113}=X_{113}/X_{11}$；

e=4，$r_{114}=X_{114}/X_{11}$；

$r_{11}=(0.53\ 251,0.41\ 143,0.05\ 606,0)$；

$r_{12}=(0.5\ 877,0.38\ 216,0.03\ 014,0)$；

$r_{13}=(0.54\ 286,0.4\ 000,0.05\ 714,0)$；$r_{14}=(0.53\ 251,0.41\ 143,0.05\ 606,0)$；$r_{21}=(0.5\ 738,0.39\ 406,0.02\ 956,0)$；

$r_{22}=(0.5\ 115,0.40\ 555,0.09\ 295,0)$；

$r_{23}=(0.52\ 112,0.39\ 437,0.08\ 451,0)$；

$r_{24}=(0.50\ 228,0.41\ 627,0.08\ 145,0)$；

$r_{31}=(0.52\ 605,0.41\ 708,0.05\ 687,0)$；

$r_{32}=(0.44\ 679,0.42\ 555,0.12\ 766,0)$；

$r_{33}=(0.5\ 115,0.40\ 555,0.08\ 295,0)$；

$r_{34}=(0.5\ 879,0.3\ 819,0.03\ 018,0)$；

$r_{41}=(0.57\ 638,0.39\ 406,0.02\ 956,0)$；

$r_{42}=(0.48\ 216,0.41\ 069,0.10\ 715,0)$；

$r_{43}=(0.44\ 679,0.42\ 555,0.12\ 766,0)$；

隶属于 B_i 的各类 B_{ij}所对应的灰类灰色评价权向量综合后得综合评价矩阵 R_i(i=1,2,3,4,5)。

$$R_i=\begin{bmatrix}0.53\ 251 & 0.41\ 143 & 0.05\ 606 & 0\\ 0.58\ 770 & 0.38\ 216 & 0.03\ 014 & 0\\ 0.54\ 286 & 0.4\ 000 & 0.03\ 014 & 0\\ 0.53\ 251 & 0.41\ 143 & 0.05\ 606 & 0\\ 0.57\ 638 & 0.39\ 406 & 0.02\ 956 & 0\\ 0.51\ 150 & 0.40\ 555 & 0.40\ 555 & 0\\ 0.52\ 112 & 0.39\ 437 & 0.08\ 451 & 0\\ 0.50\ 228 & 0.41\ 627 & 0.08\ 145 & 0\\ 0.52\ 605 & 0.41\ 708 & 0.05\ 687 & 0\end{bmatrix}$$

◆ 对 B_i 和 B 进行综合评价，对 B_1 作综合评价，其结果记为 B_1

$$B_1=W_1\times R_1$$

$B_1=(0.54\ 931,0.40\ 092,0.04\ 977,0)$；

$B_2=(0.52\ 737,0.40\ 202,0.07\ 061,0)$；

$B_3=(0.51\ 902,0.40\ 722,0.07\ 376,0)$；

$B_4=(0.50\ 922,0.40\ 811,0.08\ 267,0)$；

进一步得出受评项目 B 的综合评价结果：

$$B=W\times R$$

◆ 计算综合评价值。

由各评价灰类等值化向量 $C=$(“优”，“良”，“中”，“差”)=(4,3,2,1)，得项目 A 的综合评价值为：

$$A=B\cdot C^{T}=3.5$$

计算结果介于区间(3,4)，项目最终评价等级为“良”，说明 FPSO 体系综合防火性能良好。

3 结束语

针对 FPSO 船采用多层次灰色综合安全评价法，

进行了火灾风险评估。通过对风险因素的收集整理，从个人素质、设备状况、安全管理和环境因素四大方面构建火灾风险评价体系，进而应用多层次灰色评价法对评估内容进行多层次分析评估。为减少主观因素对权重的影响，采用 AHP 法对评价项目和各项指标进行权重分析，使权重分配更加合理。根据评价结果，得知该 FPSO 船的综合防火性能良好，与实际情况基本吻合。层次分析法与灰色评估理论的有机结合将模糊评价因素进行量化处理，解决了多层次、多因素、多变量和非定量化的评估问题。通过在实际中的应用体现出该方法具有简便、实用、直观和科学的优点，对不确定风险因素的量化处理提供了一种方法。

参 考 文 献

[1] 单连政，董本京，刘猛，等. FPSO 技术现状及发展趋势[J]. 石油矿场机械，2008，37(10)：26-30.

[2] 曹鑫，范世东. 多层次灰色综合安全评价法在油港储运中的应用[J]. 武汉理工大学学报，2009，33(4)：26-30.

[3] 罗帆. 多层次灰色评价法在新产品评估中的应用[J]. 武汉理工大学学报，2001，25(3)：294-297.

[4] 李正锋，叶金福. 多成层次灰色评价法在复杂产品系统创新评估中的应用[J]. 世界科技研究与发展，2007，29(6)：73-77.

[5] 刘思峰. 灰色系统理论与应用[M]. 北京：科学出版社，2007.

[6] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2005.

[7] 周毅，赵晓刚. 层次灰色评估法在油库火灾危险评估中的应用[J]. 油气储运，2012，31(9)：697-700.

（收稿日期　2013-12-02）

（编辑　李 娟）

（上接第 33 页）

表 5 中模拟三元复合驱采出液中模拟酸洗作业油井投产初期产出水掺入量达到 2%以上时，模拟三元复合驱采出液静置 30 min 后的水相乳化油量随模拟产出水加量增大逐渐降低的反常现象。

3 结　论

◆ 酸洗作业油井投产初期产出液对北二西试验区弱碱体系三元复合驱采出液的油水分离效果有显著的不良影响，主要表现为分离采出液和处理后回注采出液含油量大幅度增高。

◆ 井筒酸洗作业油井投产后北二西试验区三元复合驱采出液和采出液油水分离效果恶化的主要原因是作业油井投产初期产出液中含有大量 Fe^{2+}，其与地面掺水中的 S^{2-} 作用产生硫化亚铁微粒，后者吸附在油珠表面上形成阻碍油珠间相互聚并的空间位阻。

◆ 酸洗作业油井投产初期产出液中的酸洗添加剂对北二西试验区三元复合驱采出液的油水分离特性没有显著影响。

参 考 文 献

[1] 王玉普，程杰成. 三元复合驱过程中的结垢特点和机采方式适应性[J]. 大庆石油学院学报，2003，27(2)：20-24.

[2] 李金玲. 强碱三元复合驱结垢对机采井的影响及解决措施[J]. 大庆石油地质与开发，2008(3)：89-91.

[3] 赵长久. 大庆油区三元复合驱矿场结垢状况分析[J]. 油气地质与采收率，2006，13(4)：93-96.

[4] SY/T 5329—2012 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法[S].

[5] 吴迪，赵凤玲，孙福祥. 油水分离剂在低驱油剂含量三元复合驱采出液处理处理中的应用[J]. 精细与专用化学品，2006，14(12)：4-7.

[6] GB/T 8929 原油水含量测定法(蒸馏法)[S].

[7] 薛强，赵珊. 酸化作业油井投产初期产出液对弱碱体系三元复合驱采出液悬浮体含量的影响[J]. 现代化工，2014，3(3)，94-99.

[8] 吴迪，孟祥春. 大庆油田三元复合驱采出液的稳定性及其反相破乳剂的应用[J]. 精细化工，2011，18(2)：86-88.

[9] 吴迪，彭柏群. 采出液和采出液处理设施内污油的形成和稳定机制[J]. 精细与专用化学品，2012，20(11)：30-36.

（收稿日期　2014-03-24）

（编辑　李 娟）