

# 基于 GSPA-IAHP 模型的油库火灾风险评价

戴萍, 马瑶瑶

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** **目的** 对诱发油库火灾的风险进行分析, 保障油库系统的安全。 **方法** 将区间层次分析法 (Interval Analytic Hierarchy Process, IAHP) 和广义集对分析法 (Generalized Set Pair Analysis, GSPA) 相结合, 建立 GSPA-IAHP 模型, 构建三级层次结构体系, 从原料及工艺、设备设施、管理措施、火源控制方面分析引发油库火灾的风险因素, 并运用 Matlab 软件计算各项评价指标的权重, 对各个风险因素进行重要度排序。 **结果** 通过分析得出影响油库发生火灾最大的 6 个风险因素分别是: 明火、防火状况、防静电设备、防雷设备、原料危险性、工作人员素质。 **结论** 该评价方法对于油库火灾风险的评价具有适用性和有效性, 并为后期的油库安全管理提供科学依据。

**关键词:** 油库火灾; 风险因素; IAHP; GSPA; 权重

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.08.007

**中图分类号:** TJ07

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)08-0039-05

## Risk Assessment of Oil Depot Fire Based on GSPA-IAHP Model

DAI Ping, MA Yao-yao

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To analyze the risks induced by the oil depot to protect the safety of the depot system. **Methods** The interval analytic hierarchy process (IAHP) and the generalized set pair analysis (GSPA) were combined to establish a GSPA-IAHP model and a three-level hierarchy to analyze risk factors of oil depot from four aspects: raw materials and processes, equipment and facilities, management measures, and fire source control. Weights of each evaluation index were calculated with Matlab software, and each risk factor was sorted by importance. **Results** According to the analysis, the six largest risk factors affecting the fire in the oil depot were: open fire, fire protection situation, anti-static equipment, lightning protection equipment, risk of raw material and quality of staff. **Conclusion** The evaluation method has applicability and validity in risk evaluation of oil depot fire, and provides scientific basis for later safety management of oil depot.

**KEY WORDS:** oil depot fire; risk factors; IAHP; GSPA; weights

油库是收发、储存原油, 成品油及其他易燃和可燃液体化学品的独立设施, 一旦发生泄漏、爆炸或火灾, 会造成大量财产损失、人员伤亡, 破坏生态环境。因此, 对油库风险进行分析评价, 并针对主要风险采取有效的控制措施, 降低油库火灾事故的发生概率是油库管理的重要环节之一。

传统的风险评价方法主要有模糊综合评价方法、

事故树分析法、危险与可操作性分析法、美国道化学火灾爆炸指数法、英国蒙得火灾爆炸毒性指数法等<sup>[1-5]</sup>。由于油库风险因素具有复杂性和不确定性, 单一的评价方法不能客观地描述油库系统的风险。因此, 近几年来, 研究学者们综合应用多种评价方法对油库进行风险评价。例如, 张子敬<sup>[6]</sup>提出了“HAZOP十事故树十保护层”相结合的安全风险评价系统, 对

油库工艺安全进行了分析。Shi Lei 等人<sup>[7]</sup>根据改进层次分析法的模糊故障树法,分析了油罐火灾爆炸事故的风险因素。王金亮等人<sup>[8]</sup>建立了层次模糊综合分析模型,计算了影响油库安全性的各因素权重并将某些模糊数值定量化,对油库进行了安全性评价。赵传奇等人<sup>[9]</sup>通过建立 F&EI-HAZOP-FTA 综合评价模型,对油库储罐区安全进行了分析评价。Kang Jian 等人<sup>[10]</sup>提出了基于两类危险源理论的油罐区风险评价方法,利用固有风险和可控风险的耦合作用对石油储罐区进行评价。

以上改进措施虽然分析了引发油库火灾的主要风险因素,其风险评价结果具有一定地客观性,但是在评价过程中缺乏对油库各个风险因素确定性和不确定性的联系。考虑到各个风险因素具有模糊性和不确定性,文中综合运用区间层次分析法和广义集对分析法从原料及工艺、设备设施、管理措施、火源控制四个方面分析可能导致油库发生火灾的风险因素,建立了油库火灾风险三级层次结构体系,并对各个风险因素的重要程度进行排序,为完善油库风险控制措施提供了科学依据。

## 1 建立 IAHP-GSPA 模型

### 1.1 IAHP 法确定评价指标的区间权重

层次分析法(AHP)是 Satty 教授在 20 世纪 70 年代创立的一种多目标决策分析方法<sup>[11]</sup>。AHP 采用 1—9 标度的精确数值建立各个风险因素的判断矩阵,忽略了评价指标的模糊性和不确定性。为了弥补传统 AHP 法的不足,有学者提出了一种基于可能度的 IAHP 法<sup>[12-13]</sup>。IAHP 用区间数替代 1—9 标度的精确数值,两两比较评价指标的相对重要程度。该方法能有效地表达评价指标的不确定性,得到的区间权重也相对更科学、准确。

#### 1.1.1 建立层次结构分析模型

利用 AHP 法分析复杂问题时,一般将待解决的问题分解为若干个组成部分,每个组成部分再按照其属性分解成若干层级,一层一层往下构造出递阶结构模型<sup>[14]</sup>。根据研究对象的风险因素,以及各因素间的隶属关系,把目标问题分成三个层级,即总目标层、准则层、指标层,构成一个多层次结构分析模型,并计算各指标层相对于总目标层的相对权重。

#### 1.1.2 建立区间数判断矩阵

假设邀请  $m$  个熟悉油库环境的专家,根据 1—9 标度的含义(见表 1),分别对准则层、目标层的评价指标  $a_i$  与  $a_j$  的相对重要程度进行两两比较,得出一个比较区间  $A_{ij} = [a'_{ij}, a''_{ij}]$ 。 $a_{ij}$  的赋值一般由专家独立地给出,则每位专家分析得到的评价指标区间数判

断矩阵可以表示为:

$$A = \begin{bmatrix} [1,1] & \cdots & [a'_{1m}, a''_{1m}] \\ \vdots & & \vdots \\ \left[\frac{1}{a'_{lm}}, \frac{1}{a''_{lm}}\right] & \cdots & [1,1] \end{bmatrix} \quad (1)$$

各位专家的权重记为  $w_k = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ ,专家的权重按照其对本领域的权威确定,则评价指标的综合判断区间按照式(2)和(3)得出,从而建立评价指标的综合区间数判断矩阵。

$$a'_{ij} = \sum_{k=1}^m w_k \cdot a'_{ij} \quad (2)$$

$$a''_{ij} = \sum_{k=1}^m w_k \cdot a''_{ij} \quad (3)$$

表 1 1—9 标度含义

| 判断尺度    | 含义                         |
|---------|----------------------------|
| 1       | $a_i$ 与 $a_j$ 有相同重要性       |
| 3       | $a_i$ 与 $a$ 稍微重要           |
| 5       | $a_i$ 与 $a$ 重要             |
| 7       | $a_i$ 与 $a$ 强烈重要           |
| 9       | $a_i$ 与 $a$ 极端重要           |
| 2,4,6,8 | $a_i$ 与 $a$ 的重要性介于以上相邻两者之间 |
| 倒数      | $a_{ij} = 1 / a_{ji}$      |

#### 1.1.3 计算评价指标的区间权重

1) 计算满足区间数判断矩阵互反性的一致性数字判断矩阵及其权重。设一致性数字判断矩阵为

$$N = (n_{ij})_{m \times n}, \text{ 其中, } n_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n \frac{a'_{ik} a''_{jk}}{a'_{jk} a''_{ik}}} \quad (j=1,2,\dots,n)。$$

一致性数字判断矩阵  $N$  的权重向量为  $w_j = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。权重向量的计算公式为:

$$w_j = \frac{\sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a'_{jk} a''_{jk}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a'_{jk} a''_{jk}}} \quad (4)$$

2) 计算两端极差矩阵及其权重。根据区间数判断矩阵  $A$  和一致性数字矩阵  $N$  求得两端极差矩阵分别为:  $\Delta_1 n_{ij} = n_{ij} - a'_{ij}$ ,  $\Delta_2 n_{ij} = a''_{ij} - n_{ij}$ 。极差矩阵权重为:

$$\left(\Delta_k w_j\right)^2 = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n n_{ij}\right)^4} \sum_{i=1}^n \left(\Delta_k n_{ij}\right)^2 \quad (5)$$

3) 根据步骤 1) 和 2) 计算得到各个评价指标  $j$  的区间权重:

$$w = \left[ \left(w_1^L, w_1^H\right), \left(w_2^L, w_2^H\right), \dots, \left(w_n^L, w_n^H\right) \right] \quad (6)$$

式中： $w_j^L = w_j - \Delta_1 w_j$ ， $w_j^R = w_j + \Delta_2 w_j$ （ $j=1, 2, \dots, n$ ）。

1.2 GSPA 法确定评价指标的综合权重

由于 IAHP 法求得的各个评价指标权重是区间数，且主观性较强，在实际应用过程中应用较少。因此，文中引入 GSPA，把权重区间的确定性和不确定性作为研究对象，从同一度、差异度和对立度方面描述评价指标的权重区间，并进行归一化处理，得到精确的权重区间。运用 GSPA-IAHP 模型对各个评价指标的权重进行计算，降低了主观性的影响，使评价结果更具科学性。

1.2.1 建立同异反联系数

根据 GSPA 中同异反理论，将权重向量  $w_j (j=1, 2, \dots, n)$  与区间  $[0, 1]$  组成一个集对，则评价指标的同异反联系数为：

$$\mu_j = a_j + b_j i + c_j j = w_j^L + (w_j^R - w_j^L) i + (1 - w_j^R) j$$
 (7)

式中： $a_j = w_j^L$  表示同一性，即评价指标权重确定能达到的程度； $b_j = (w_j^R - w_j^L)$  表示差异性，即评价指标权重不确定能达到的程度； $c_j = (1 - w_j^R)$  表示对立性，即评价指标权重确定不能达到的程度。

1.2.2 确定评价指标的综合权重

油库风险评价指标的综合权重取决于联系数的确定性和不确定性的相对权重。将评价指标联系数的确定性和不确定性进行分析和归一化处理。

确定性和不确定性两部分的相对权重分别为：

$$(w_j)_{CE} = \frac{1 + a_j - c_j}{\sum_{k=1}^n (1 + a_k - c_k)}$$
 (8)

$$(w_j)_{UNCE} = \frac{1 - b_j}{\sum_{k=1}^n (1 + a_k - c_k)}$$
 (9)

油库火灾风险评价指标的综合权重为：

$$w_j = \frac{(w_j)_{CE} \cdot (w_j)_{UNCE}}{\sum_{k=1}^n [(w_k)_{CE} \cdot (w_k)_{UNCE}]}$$
 (10)

2 应用分析

2.1 建立层次分析模型

应用 GSPA-IAHP 模型对某油库火灾风险进行分析评价。根据油库的实际情况，以建立的三级层次结构体系为依据，利用 Matlab 计算该油库各个评价指标的权重，分析诱发油库火灾的主要风险因素。

以油库火灾风险（A）为总目标层，构建了三级层次结构体系，如图 1 所示。其中，准则层指标分别为：原料及工艺风险（B1）、设备设施风险（B2）、管理措施风险（B3）、火源控制风险（B4）。指标层包括：原料危险性（C1）、原料储存量（C2）、生产工艺（C3）、防静电设备（C4）、防雷设备（C5）、消防设施（C6）、工作人员素质（C7）、检修情况（C8）、规章制度（C9）、风险防范措施（C10）、防火状况（C11）、明火（C12）共 12 项指标。

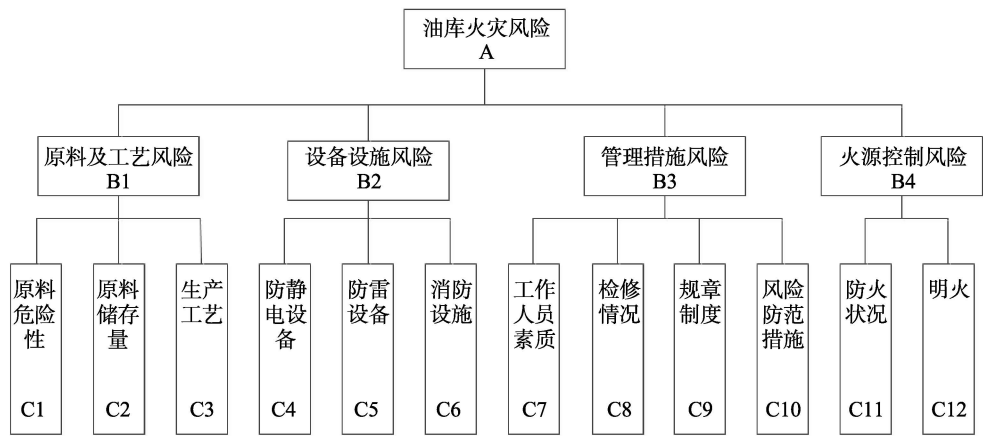


图 1 油库火灾风险层次结构

2.2 计算油库风险评价指标区间权重

邀请 3 位熟悉油库环境的专家分别分析油库的风险因素，根据 1—9 标度对三个评价指标进行两两比较，确定评价指标的区间数判断矩阵。以 B1 原料及工艺风险中 C1、C2、C3 评价指标为例，根据式

（1），三位专家分析得到的评价指标区间数判断矩阵分别为：

$$B_1^{(专家1)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [1,2] & [3,4] \\ [0.5,1] & [1,1] & [2,4] \\ [0.25,0.3333] & [0.25,0.5] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$B_1^{(\text{专家2})} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,3] & [2,4] \\ [0.3333,0.5] & [1,1] & [2,3] \\ [0.25,0.5] & [0.3333,0.5] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$B_1^{(\text{专家3})} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,3] & [3,4] \\ [0.3333,0.5] & [1,1] & [2,3] \\ [0.25,0.3333] & [0.3333,0.5] & [1,1] \end{bmatrix}$$

根据专家的知识储备、专业能力等因素,赋予三位专家的权重分别为  $w_k = (0.32, 0.3, 0.38)$ 。根据式(2)和(3),计算得到评价指标的综合判断区间,从而建立评价指标的综合区间数判断矩阵,见表2。

表2 原料及工艺风险的区间数判断矩阵

| $B_1$ | C1              | C2           | C3        |
|-------|-----------------|--------------|-----------|
| C1    | [1,1]           | [1.68,2.68]  | [2.7,4]   |
| C2    | [0.3731,0.5952] | [1,1]        | [2.3,3.2] |
| C3    | [0.25,0.3703]   | [0.3012,0.5] | [1,1]     |

根据公式(4)~(6)可得,原料及工艺风险中评价指标的一致性数字判断矩阵为  $N = n_{ij} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1.7908 & 3.8943 \\ 0.5584 & 1 & 2.1747 \\ 0.2568 & 0.4598 & 1 \end{bmatrix}, \text{一致性数字判断矩阵权重}$$

向量为  $w = (0.5509 \ 0.3076 \ 0.1415)$ , 两端极差矩阵分别为:  $\Delta_1 w = (0.0200 \ 0.0113 \ 0.0084)$ ,  $\Delta_2 w = (0.0268 \ 0.0134 \ 0.0099)$ 。总目标下区间数权重向量为:  $w = [[0.5241, 0.5709] \ [0.2963, 0.3210] \ [0.1331, 0.1514]]$ 。

## 2.3 计算评价指标的综合权重

根据IAHP求得的油库火灾风险总目标下各个层次区间数判断矩阵及其权重向量,运用GSPA计算精确的权重向量。 $C_1, C_2, C_3$ 评价指标的同异反联系数分别为:

$$\mu_1 = 0.5241 + 0.0468i + 0.4291j$$

$$\mu_2 = 0.2963 + 0.0247i + 0.6790j$$

$$\mu_3 = 0.1331 + 0.0183i + 0.8486j$$

根据公式(8)~(10)可得,确定性和不确定部分的相对权重分别为:  $(w_j)_{CE} = (0.5484 \ 0.3091 \ 0.1425)$ ,  $(w_j)_{UNCE} = (0.3275 \ 0.3351 \ 0.3373)$  ( $j=1, 2, 3$ )。因此,总目标下准则层区间数判断矩阵的综合权重为:  $w = (0.5421 \ 0.3127 \ 0.1452)$ 。

同理,可以求得在油库火灾风险总指标下的各个评价指标权重,油库火灾风险评价指标的综合权重见表3。

评价指标的综合权重值的大小反映了各个评价指标对油库火灾风险总目标的影响程度,其数值越大影响程度越大。根据表3可得该油库火灾风险因素排

序:  $C_{12} > C_{11} > C_4 > C_5 > C_1 > C_7 > C_6 > C_8 > C_2 > C_{10} > C_3 > C_9$ , 其结果与油库的实际情况基本相符。通过分析得出影响油库发生火灾最大的6个风险因素分别是:明火、防火状况、防静电设备、防雷设备、原料危险性、工作人员素质。因此,油库在日常工作中应当加强对上述6个因素的管理。

表3 评价指标的综合权重

| A     | $B_1$  | $B_2$  | $B_3$  | $B_4$  | 综合权重   |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 准则层权重 | 0.1084 | 0.3042 | 0.1388 | 0.4486 |        |
| C1    | 0.5421 | 0      | 0      | 0      | 0.0588 |
| C2    | 0.3127 | 0      | 0      | 0      | 0.0339 |
| C3    | 0.1452 | 0      | 0      | 0      | 0.0157 |
| C4    | 0      | 0.5352 | 0      | 0      | 0.1628 |
| C5    | 0      | 0.3210 | 0      | 0      | 0.0976 |
| C6    | 0      | 0.1438 | 0      | 0      | 0.0437 |
| C7    | 0      | 0      | 0.4023 | 0      | 0.0558 |
| C8    | 0      | 0      | 0.2997 | 0      | 0.0416 |
| C9    | 0      | 0      | 0.1126 | 0      | 0.0156 |
| C10   | 0      | 0      | 0.1854 | 0      | 0.0257 |
| C11   | 0      | 0      | 0      | 0.3888 | 0.1744 |
| C12   | 0      | 0      | 0      | 0.6112 | 0.2742 |

## 3 结论

1) 针对油库的特点,运用GSPA-IAHP方法对油库火灾风险进行分析,得出对油库火灾风险影响最大的6个因素依次为:明火、防火状况、防静电设备、防雷设备、原料危险性、工作人员素质的结论。因此,在油库的日常维护过程中,应加强对火源的控制和设备的检查,提高有关人员的工作素质,建立完善的油库风险防范体系,从根本上预防油库事故的发生。

2) IAHP采用区间数的形式描述评价指标的不确定性,GSPA采用同异反理论将权重区间的确定性和不确定性联系起来,得到确定的权重向量,使油库火灾风险评价更具精确性。因此,建立GSPA-IAHP模型分析各项评价指标对油库火灾风险的影响程度,该方法既适应于油库火灾风险的整体评价,也适应于某阶段的风险分析,为油库风险评价提供了一种新思路。

## 参考文献:

- [1] 朱序璋,杨宏刚,赵江平,等.基于模糊理论的加油站安全评价方法研究[J].中国安全生产科学技术,2005,1(6): 51-54.
- [2] 顾莉,刘晓东,鄢洪青.故障树在油库火灾爆炸事故风险评价中的应用[J].环境科学与技术,2007,30(6): 52-54.
- [3] 杜廷召,田文德,任伟.危险与可操作性分析研究[J].

- 现代化工, 2010, 30(7): 90-93.
- [4] 陈学锋, 于倩秀. Dow 分析法在石油库安全评价中的应用[J]. 天然气与石油, 2006, 24 (1): 24-28.
- [5] 黄坤, 朱洪杰, 苏欣, 等. 油库安全评价方法现状[J]. 石油工程建设, 2006, 32(1): 1-7.
- [6] 张子敬. 基于 HAZOP 方法的原油库工艺安全分析[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2016.
- [7] SHI L, SHUAI J, XU K. Fuzzy Fault Tree Assessment based on Improved AHP for Fire and Explosion Accidents for Steel Oil Storage Tanks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278: 529-538.
- [8] 王金亮, 陈全. 模糊层次综合分析法在油库安全评价中的应用[J]. 化学工程与装备, 2011(3): 162-166.
- [9] 赵传奇, 张巨伟, 张园园, 等. 油库储罐区 F&EI-HAZOP-FTA 综合评价模型的建立[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2017, 32(1): 53-60.
- [10] KANG J, LIANG W, ZHANG L B, et al. A New Risk Evaluation Method for Oil Storage Tank Zones based on the Theory of Two Types of Hazards[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29: 267-276.
- [11] 苏欣, 袁宗明, 王维, 等. 层次分析法在油库安全评价中的应用[J]. 天然气与石油, 2006, 24(1): 1-4.
- [12] 肖峻, 王成山, 罗凤章. 区间层次分析法的权重求解方法初探[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(11): 1597-1660.
- [13] 吴育华, 诸为, 高荣, 等. 区间层次分析法 IAHP[J]. 天津大学学报, 2004, 28(5): 700-705.
- [14] 王纪洋, 张明广, 王雪栋. 基于 AHP-TOPSIS 模型的危险化工工艺风险等级评价研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(6): 100-105.