

模糊综合评价法在液体推进剂罐区 风险评价中的应用

刘渊^{1,2}, 王煊军¹, 夏本立², 丛继信²

(1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2. 总装备部后勤部防疫大队, 北京 100101)

摘要: 文章分析了液体推进剂贮存罐区风险因素的层次关系, 将影响推进剂罐区安全的因素划分为人员素质、安全管理、罐区设备、储存设备、充装过量等不同的层次。通过层次分析法确定上述各影响因素的权重, 运用模糊综合评价方法对液体推进剂贮存罐区风险进行了评价。结果表明: 液体推进剂贮存罐区风险为第二等级, 风险较大; 在诸多影响因素中, 安全管理所占的权重最大, 其次权重按人员素质、充装过量、罐区设备、存储设备逐渐减小。最后, 文章对事故的预防提出了有针对性的措施。

关键词: 液体推进剂罐区; 模糊综合评价; 层次分析法; 安全评价

中图分类号: O159; X949

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2010)04-0515-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.04.025

0 前言

液体推进剂被广泛应用于航天和国防领域。各国发射航天器(包括卫星、飞船、探测器等)的运载火箭均是采用液体推进剂。液体推进剂为易燃易爆、有毒有害物质, 稍有不慎就会引起财产损失和重大人员伤亡, 造成严重后果。因此, 对液体推进剂储存罐区的风险进行安全评价是十分必要的。

关于液体推进剂的风险评价多是定性的分析。从安全管理方面包括法律法规、安全理论的教育, 液体推进剂、防护措施的学习等, 这些仍然还不足以表达清楚, 因为液体推进剂在长期贮存中发生事故的原因是多样的、复杂的, 具有不确定性。因此, 现有的一些评价方法缺乏科学性和合理性, 得到的结论也是片面的。

本文拟建立一种基于模糊综合评价法的推进剂罐区安全评价模型。模糊综合评价方法是根据模糊数学理论, 应用模糊变换原理和最大隶属度原则, 结合多因素系统的特征, 考虑与被评价事物相关的各个因素进行总体评价的一种方法。它可以全面地考虑造成液体推进剂罐区事故的各种因素, 将定性分析与定量分析有机结合起来, 既能够充分体现评价因素和评价过程的模糊性, 又尽量减少个人主观

臆断所带来的弊端, 因此比一般的评比打分等方法更符合客观现实, 评价结果更可信^[1]。

1 模糊综合评价方法

模糊测评的基本原理可概括为: 测评因素有 m 个, 因素集合为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 评语有 n 个, 评语集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 因素集与评语集之间的模糊关系用模糊关系矩阵 R 表示。模糊关系矩阵为

$$R = [R_1, R_2, \dots, R_m]^T = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: r_{ij} 为测评因素 u_i 对评语等级 v_j 的隶属度,

$r_{ij} = \mu R(u_i, v_j)$, $\mu R(u_i, v_j)$ 为隶属函数。

$R_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}]$ 是第 i 个因素 u_i 的单因素测评, 它是评语集 V 上的模糊子集。

设因素集合 U 上的因素模糊子集

$$A = \bigcup_{i=1}^m \frac{a_i}{u_i}, \quad (0 \leq a_i \leq 1), \quad (2)$$

式中: a_i 为 u_i 对 A 的隶属度, 它是单因素在总评测因素中所起作用大小的量度, 即因素的重要性或权重。

收稿日期: 2010-04-10; 修回日期: 2010-04-14

基金项目: 总后勤部科研基金(项目编号 08G060)

作者简介: 刘渊(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为安全与环境工程。E-mail: liuyuanbixue@163.com。

设评语集 V 上的等级模糊子集

$$B = \bigcup_{j=1}^n \frac{b_j}{v_j}, \quad (0 \leq b_j \leq 1), \quad (3)$$

式中 b_j 为等级 v_j 对评价所得子集 B 的隶属度, 也就是评测结果。

在此基础上可以进行二级模糊评价, 用 C 来表示, 记为

$$C = A \circ B, \quad (4)$$

式中运算符号 “ $\circ$ ” 表示模糊矩阵的合成运算。

2 推进剂罐区风险评价的指标体系

影响推进剂罐区风险等级的因素复杂, 根据专家在推进剂领域的工作经验总结, 结合液体推进剂

的理化特性并参考国内外石化等行业贮存情况, 采用定量和定性分析, 将研究对象分为 3 个层次:

1) 推进剂罐区风险等级评价作为模型的目标层是这一问题的最终目的 (层次 I);

2) 人员素质、安全管理、罐区设备安全可靠、储存设备、充装过量等因素决定了罐区风险等级, 但其影响方式还需通过与其相关的具体因素来体现, 这是解决问题的中间环节, 亦即模型的准则层 (层次 II);

3) 各具体的指标构成了本模型的决策层 (层次 III), 通过对该层次问题的决策, 即可最终达到所要求解的目标。

推进剂罐区风险评价指标体系如图 1 所示。

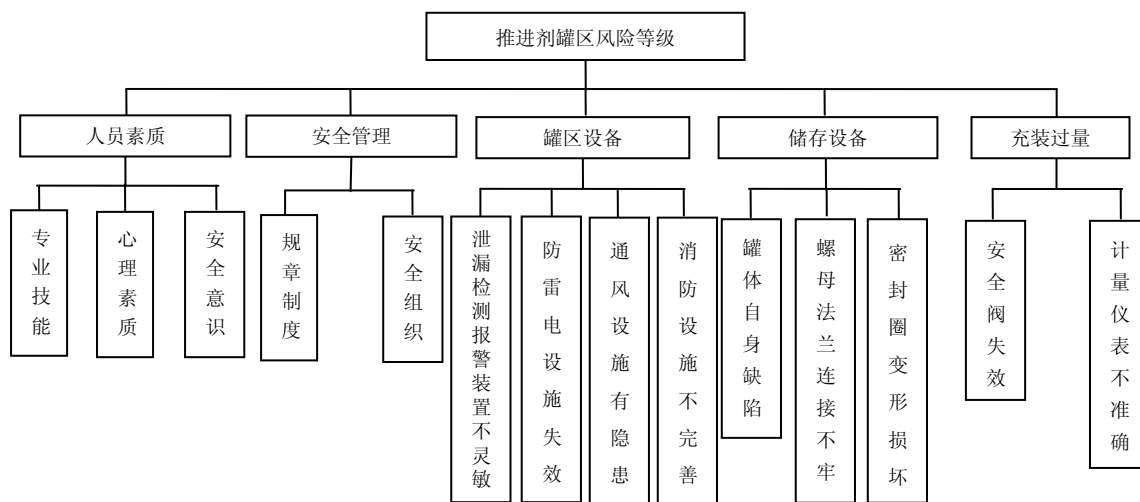


图 1 推进剂罐区风险评价指标体系

Fig. 1 The risk evaluation index system of UDMH station

3 风险评价模型

根据上述对影响因素的分析, 应用模糊综合评价法建立液体推进剂贮存罐区的风险评价模型。由于液体推进剂是特种燃料, 其使用部门和单位对人员的选用和管理有严格制度, 因此本文在有关人员素质因素方面仅考查专业技能、心理素质和安全意识 3 个指标。

3.1 综合评价因素集

本文建立的推进剂罐区安全影响因素模型包括 5 个方面, 建立因素集 $U = \{\text{人员素质, 安全管理, 罐区设备, 储存设备, 充装过量}\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ 。

3.2 各评价因素的子因素集

$u_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}\} = \{\text{专业技能, 心理素质, 安全意识}\};$

$u_2 = \{u_{21}, u_{22}\} = \{\text{规章制度, 安全组织}\};$

$u_3 = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}\} = \{\text{泄漏报警装置, 防雷电设施, 通风设施, 消防设施}\};$

$u_4 = \{u_{41}, u_{42}, u_{43}\} = \{\text{罐体自身缺陷, 螺母法兰连接不牢, 密封圈变形损坏}\};$

$u_5 = \{u_{51}, u_{52}\} = \{\text{安全阀失效, 计量仪表不准确}\}。$

3.3 建立评价集

根据影响因素导致在推进剂罐区发生事故可能性的, 以及事故发生可能带来的危害后果,

将发生事故的风险划分为5个等级, 即 $V=\{\text{一级, 二级, 三级, 四级, 五级}\}$, 级数越高表示风险程度越小。

3.4 层次分析法确立权重

确定因素权重的方法有很多, 包括德尔菲(Delphi)法、专家调查法和层次分析法等, 其中层次分析法(analytic hierarchy process, AHP法)是目前应用较为广泛的一种方法^[2]。AHP法通过比较几个因素对同一目标的影响, 从而确定各因素在目标中所占比重。应用层次分析法, 计算导致推进剂罐区事故风险的5个方面因素的权重。

1) 构建评价各因素相对重要性的判断矩阵

应用1~9标度方法^[3], 将每一层中各因素的相对重要性用数值表示出来, 建立推进剂罐区发生事故影响因素的判断矩阵(见表1)。

表1 影响因素的判断矩阵
Table 1 Judgment matrix of affecting factors

影响因素	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
人员素质	1	1/2	2	3	3
安全管理	2	1	5	4	5
罐区设备	1/2	1/5	1	2	1/3
储存设备	1/3	1/4	1/5	1	1/2
充装过量	1/3	1/5	3	2	1

2) 计算权重

利用方根法^[3]计算出各因素权重, 其中 $i, j=1, 2, \dots, n$ ($n=5$)。见表2。

表2 影响因素的权重计算
Table 2 Calculation of weight of affecting factors

风险因素	判断矩阵每行元素乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n u_{ij}$	M_i 的 n 次方根 $W_i = \sqrt[n]{M_i}$	权值 $w_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^n W_j}$
人员素质	9	1.551 8	0.245 8
安全管理	200	2.885 4	0.457 1
罐区设备	0.066 7	0.581 8	0.092 2
储存设备	0.020 8	0.461 1	0.073 0
充装过量	0.400 0	0.832 6	0.131 9

3) 计算判断矩阵的最大特征值

计算得到判断矩阵的最大特征值为

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(RW)_i}{nw_i}, \quad (5)$$

4) 判断矩阵的一致性检验

一致性指标^[3]为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)R}. \quad (6)$$

RI 为平均随机一致性指标, 当随机一致性比

值 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$ 时, 认为该判断矩阵具有一致性。

用1~9标度法得到的判断矩阵的RI见表3^[2]。

表3 平均随机一致性指标 RI
Table 3 Average random consistence index RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

本文中 $n=5$, 故 $RI=1.12$, 代入式(5)和(6)得 $\lambda_{\max}=5.236 1$, $CI=0.059 0$, 从而得到一致性比值 $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.059 0}{1.12} = 0.052 7 < 0.1$, 因此接受判断矩

阵的一致性。由式(2)得到各因素的权重分配为

$$A=(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)=(0.2458, 0.4571, 0.0922, 0.0730, 0.1319)。$$

按照同样方法和步骤计算出其他因素和评价指标的权重。

$$a_1=(a_{11}, a_{12}, a_{13})=(0.117 2, 0.268 4, 0.614 4);$$

$$a_2=(a_{21}, a_{22})=(0.5, 0.5);$$

$$a_3=(a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_{34})=(0.26, 0.34, 0.16, 0.12);$$

$$a_4=(a_{41}, a_{42}, a_{43})=(0.139 7, 0.322 5, 0.527 8);$$

$$a_5=(a_{51}, a_{52})=(0.3, 0.7)。$$

3.5 建立因素等级评价矩阵

根据专家打分, 由式(1)得出各个因素的模糊隶属度矩阵:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.6 \\ 0.1 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.5 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \end{pmatrix};$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.32 & 0.38 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{pmatrix}。$$

3.6 一级模糊综合评价

将各因素集的权重分配和等级评价矩阵代入式(3), 得到各因素集的一级模糊综合评价为

$$B_1 = (0.249\ 7, 0.538\ 6, 0.173\ 2, 0.038\ 6, 0);$$

$$B_2 = (0.350\ 0, 0.450\ 0, 0.150\ 0, 0.050\ 0, 0);$$

$$B_3 = (0.196\ 0, 0.196\ 0, 0.150\ 0, 0.130\ 0, 0.048\ 0);$$

$$B_4 = (0.245\ 8, 0.481\ 0, 0.139\ 7, 0.068\ 8, 0);$$

$$B_5 = (0.254\ 0, 0.386\ 0, 0.260\ 0, 0.010\ 0, 0)。$$

由此可得总的一级模糊综合评价为

$$B = \begin{pmatrix} 0.249\ 7 & 0.538\ 6 & 0.173\ 2 & 0.038\ 6 & 0 \\ 0.350\ 0 & 0.450\ 0 & 0.150\ 0 & 0.050\ 0 & 0 \\ 0.196\ 0 & 0.196\ 0 & 0.150\ 0 & 0.130\ 0 & 0.048\ 0 \\ 0.245\ 8 & 0.481\ 0 & 0.193\ 7 & 0.068\ 8 & 0 \\ 0.254\ 0 & 0.386\ 0 & 0.260\ 0 & 0.010\ 0 & 0 \end{pmatrix}。$$

3.7 二级模糊综合评价

将一级模糊综合评价矩阵和各因素的权重分配代入式(4), 得到二级模糊综合评价为 $C = A \circ B = (0.291\ 1, 0.442\ 2, 0.173\ 4, 0.062\ 4, 0.022\ 9)。$

根据最大隶属度原则^[4], 由 $C_{\max} = 0.4422$, 可判定液体推进剂罐区的风险为二级风险, 即风险较大。在实际情况中, 推进剂在贮存过程中经常发生跑、冒、滴、漏^[5]情况, 评价结果能够较好地反映出推进剂在贮存中存在的风险。

4 结论与事故预防措施

本文应用模糊综合评价法对液体推进剂罐区存在的风险进行评价。评价结果表明, 推进剂罐区风险较大。导致液体推进剂罐区发生事故的各种因素中, 安全管理因素所占权重较大, 其次为人员素质、充装过量、罐区设备、存储设备。因此, 相关单位首先要完善规章制度, 健全安全组织, 并严格落实, 要提高人员作业素质, 教育培训好所属人员; 其次应根据自身情况, 在日常的装备检查、维修和保养中应落实各项规定, 特别是做好通风设施、消防设施、防雷电设施、管道接头、连接部位、阀门和密封装置的检查、维修或更换。

尽管液体推进剂贮存中能够引起事故的原因是多方面的, 但是人员、设备及其所处的环境等因素是可以通过妥善的安全管理予以制约。因此, 为防止事故的发生, 主要可从以下3个方面进行预防:

1) 防止人为失误

①通过培养训练, 加强人员对液体推进剂理化性质和毒性毒理的认识, 熟悉贮存管理中的操作规程, 如取样化验、抽吸液罐操作规程等; ②作业人员的生理和心理状态、技术水平、思想素质应达到安全的要求, 要根据人体生物钟原理来保证, 通过加强安全责任制来实现^[6]; ③锻炼能力和防护演练, 以保证人员有良好的心理素质, 掌握在出现紧急状况时如何应对, 把事故消除在萌芽或者制止事故的蔓延。

2) 控制设备故障的发生率

设备发生故障的原因主要有密封部件的变形、损坏、腐蚀, 容器的腐蚀, 安全附件如安全阀不起作用, 以及设备材料与推进剂不能长期相容等等, 为此要制定安全检查计划并落实安全检查制度, 预防事故潜在作用力的蓄积。

3) 改善贮存环境

液体推进剂与水作用或者吸收空气中的水分后能产生腐蚀作用, 因此贮存环境要除湿。液体推进剂在贮存库中的挥发, 不仅形成了有毒有害气体环境, 而且氧化剂气体能够产生爆炸, 因而通风是必需的。另外, 还要布置消防水幕, 设置防火墙; 通风口或空调进口不能靠近污染源。如果在设计上不能解决, 则可利用供空气或供氧的呼吸器保护操作人员。

参考文献 (References)

- [1] 陈杰, 石超, 方来华. 基于灰色关联分析和 AHP 的 CNG 加气站安全评价方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2009(4): 186-187
- [2] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法[M]. 北京: 科技出版社, 1986
- [3] Saaty T L. Multicriteria decision-making: the analytic hierarchy process[D]. Pittsburgh, PA, U.S.: University of Pittsburgh, 1988
- [4] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 2-89
- [5] 刘建才, 王煊军, 李正莉. 阵地大型液体推进剂储罐的泄漏及其防治[C]//化学推进剂应用技术研究进展, 2005: 178-181
- [6] 隋鹏程, 陈宝智, 隋旭. 安全原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 132-133