基于 FAHP-FCE 的天然气管网风险评价方法

徐 媛[1] 鱼永强[2] 高岗岗[2] 王庆辉[2]

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司;2. 中国石油庆阳石化公司)

摘 要 天然气管网系统风险因素庞杂且相互关联,如何确定这些因素对整个系统的影响程度是天然气管网系统风险评价的关键。但目前对该问题的处理方法主要是由分析人员主观认定,缺乏科学性。基于此,文章提出了基于模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process,FAHP)的重要度排序方法,通过对影响因素间的相互对比,从而实现所有因素重要度的判定,再采用模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation,FCE)进行系统风险定量计算,量化系统的风险水平,为系统的风险管控和防护提供科学指导。

关键词 天然气管网;模糊层次分析法;模糊综合评价法;风险评价

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2019.02.014 **文章编号:** 1005-3158(2019)02-0053-04

0 引 言

因天然气具有热值高、安全环保等优点,目前已经在国内各城市居民生活中得到广泛使用。但伴随着天然气管道建设的增多,若不重视安全防控,有发生着火爆炸、中毒等事故的风险,并有可能造成灾难性的后果,如 2017 年"7·4"天然气管道泄漏爆炸事故造成 7 人死亡(当场死亡 5 人,住院医治无效死亡 2 人),85 人受伤(重伤 13 人,轻伤 72 人),事故造成直接经济损失 4 419 万元[1]。台湾的"8·1"高雄市天然气泄漏爆炸事故[2]等,均造成灾难性的后果。因此,对天然气管网进行风险评价并找出可能事故原因对保障管网安全平稳运行具有重要意义。

目前,常用的风险分析方法有事故树(Fault Tree,FT)分析、事件树分析及层次分析法等[3]。其中因事故树分析过程思路清晰、表现形式直观、结果合理可靠,而得到广泛应用[4-5]。但该方法更适用于具体事故的分析,难以应用于系统的风险评价。事件树分析法主要是用于具体事故后果演化推理分析,同样不适用于系统的风险分析和评价。而层次分析法是一种通过构建指标体系从而实现对整个系统进行风险分析的方法,该方法原理简单,又能克服传统方法中评价人员主观性影响分析结果的不足[6]。但该方法主要用于识别系统中主要风险影响因素,不能进行风险量化,且存在评价矩阵一致性差的问题。本文针对目前存在的问题提出了基于 FAHP-FCE 的天然气管网风险评价方法。通过构建天然气管网风险评价体系,识别系统各风险因素的重要程度,并量化系统的风险水平,以期能够为天然气管网风险管控、事故预防等提供参考依据。

1 FAHP-FCE 评价模型

1.1 模糊层次分析法

模糊层次分析方法主要用于复杂系统的量化分析,根据分析对象的特点将分析目标整理成若干条关键要素,再将这些要素进行逐层分析,形成一个多层分析模型,利用因素间的逻辑关系得到各因素重要度的过程[7-9]。传统的层次分析法在求解过程中会存在难以满足一致性的问题,因此本文对该方法进行了改进,利用模糊数学来规范判断矩阵的构造,以保证求解结果的可靠性,该方法的主要流程如下。

1.1.1 建立指标体系

指标体系构建是将所分析的问题进行整理,明确分析的总目标,并归纳与总目标相关的独立子因素,再进行逐层分析,最终形成一个多层次的结构模型,并将该层次结构按照逻辑关系分为目标层、准则层和指标层。

1.1.2 构建模糊判断矩阵

将指标体系中目标层下的准则层、准则层各因素下对应的指标层因素分别进行两两对比,形成的对比矩阵称为判断矩阵,如某因素 C 的子因素集包括(a_1,a_2,…,a_n),则 C-a 的判断矩阵可表示为:

C	a_1	a_2	…	a_n
a_1	r_{11}	r_{12}	…	r_{1n}
a_2	r_{21}	r_{22}	…	r_{2n}
…	…	…	…	…
a_n	r_{n1}	r_{n2}	…	r_{nn}

徐媛,2018 年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业,现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司环保技术研究所从事环保技术管理工作。通信地址:北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼,102206。E-mail:xu-yuan@cnpc.com.cn。

其中因素 r_{ij} 表示的是一种相对重要度的比较关系，即表示两个子因素 a_i 和 a_j 相对于其上层指标 C 进行比较时这两个因素的相对重要度。为了使比较结果能够进行定量描述和计算，在实际应用中将相互间的重要度按照表 1 所示的 0.1～0.9 标度给予数量标度。

表 1 0.1～0.9 标度及含义

标度	含义
0.5	两因素比较，同等重要
0.6	两因素比较，一个比另一个稍微重要
0.7	两因素比较，一个比另一个明显重要
0.8	两因素比较，一个比另一个重要的多
0.9	两因素比较，一个比另一个极端重要
0.1，0.2，0.3，0.4 反比较	

为了保证所构建的判断矩阵求解结果满足一致性的要求（本质是人员对事物认知的一致性），需要保证矩阵中任意行间对应因素的绝对差值为常数，当为非常数时按照少数服从多数的原则进行调整。

1.1.3 计算各因素相对权重

通过对所构建的模糊判断矩阵进行求解得到各因素对应的权重值，即因素集 $\{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$ 所对应的权重值集 $\{W_1, W_2, \cdots, W_n\}$，为了保证各子因素集在同一尺度下比较，需要进行归一化处理，即可求得评价因素权重向量。

1.1.4 风险因素层次总排序

为了判断指标层因素相对于目标层因素的相对重要度，还需要进行风险因素的总排序。这一求解过程是由指标层相对于准则层权重和准则层相对于目标层权重组合计算得到，计算过程如公式（1）所示。

$$W = W_0 \cdot L_0 \tag{1}$$

式中：W_0 为准则层因素对于目标层的权重向量，L_0 为各指标层因素相对于上一层准则层的权重组合。

1.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法[10-11]是一种基于模糊数学进行系统总体状态评价的分析方法，通过行业专家对分析系统所建立指标体系的底层因素进行状态判定，再结合这些因素的权重值得到系统的总体状态得分，从而判断系统的当前状态。该方法的模型见公式（2）。

$$F = C \cdot S^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中：F 为系统总得分；C 为系统的判断矩阵；S 为各因素安全等级加权值。

$$C = A \cdot B \tag{3}$$

式中：A 为各因素权重分配集，由各因素影响决定；B 为总评价矩阵。

$$B_i = A_i \cdot R_i \tag{4}$$

式中：R_i 为各因素的评价矩阵，通常由若干专家进行打分得到。另外，根据相关文献[12-13]制定了相应的安全等级加权值和安全等级判断标准，分别见表 2 和表 3。

表 2 安全等级加权值 S

安全级别	好	较好	中等	较差	差
分数	95	80	65	45	30

表 3 安全等级判断

系统得分 F	＞90	80～90	60～79	40～59	40＞
安全级别	好	较好	中等	较差	差

1.3 评价分析

首先根据计算结果确定所分析天然气管网系统的安全等级。其次，按照风险因素权重大小进行总排序，找出对系统安全性影响较大的因素集（权重越大，影响越大）。最后再根据评价结果对系统的安全状况作出客观综合评价，并依此为安全管理的依据，可以针对性地提出风险管控措施。

2 实例分析

以某市天然气管网系统为例，对所提出的方法进行实例验证。将该市天然气管网系统中涉及安全的因素从人、机、环、管 4 个方面进行全方位的分析，确定该市天然气管网系统的安全等级，并找出主要影响因素，进行针对性地处理。

2.1 指标体系建立

通过对天然气管网系统中人、机、环、管 4 个方面的细化分析，以天然气管网风险系统为目标层构建了风险评价指标体系，体系中共包括 25 个指标层因素，见图 1。

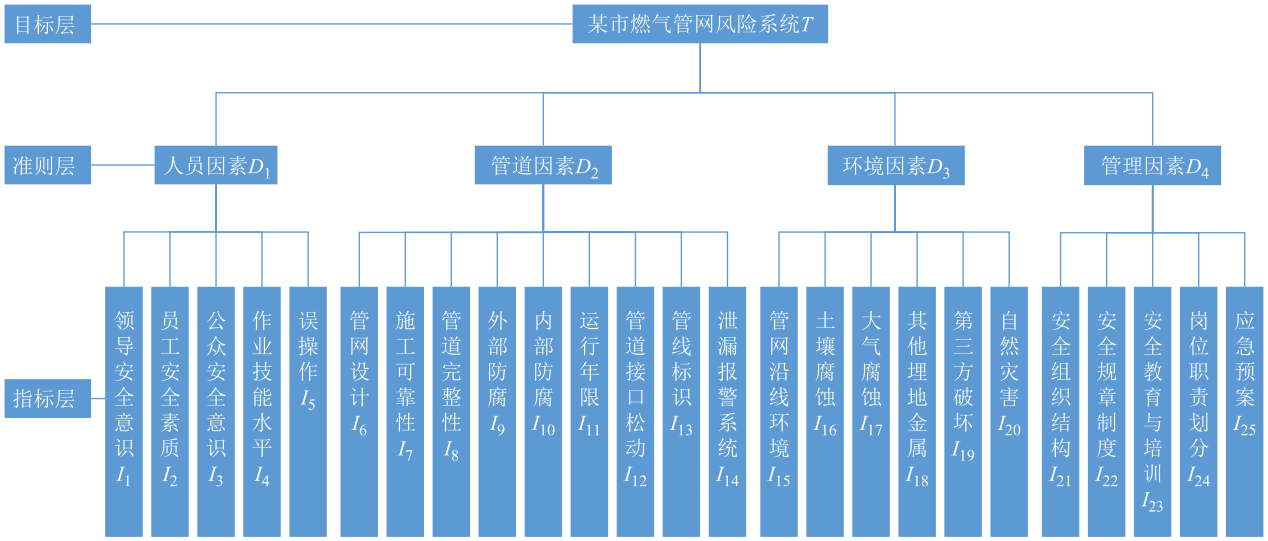

图 1　天然气管网风险评价指标体系

2.2 指标权重计算

通过行业从业人员或领域内专家对各指标因素间的相对重要度进行两两对比,得到各层次间的判断矩阵,其中准则层相对于目标层的 T-D 判断矩阵如下所示:

T	D_1	D_2	D_3	D_4
D_1	0.5	0.4	0.6	0.5
D_2	0.6	0.5	0.7	0.6
D_3	0.4	0.3	0.5	0.4
D_4	0.5	0.4	0.6	0.5

由上述判断矩阵可求得向量 W_0,归一化处理后为:$W_0=(0.250,0.301,0.199,0.250)$。

同理,分别求得指标层相对准则层归一化的权重向量 W_1、W_2、W_3、W_4。最终得到指标层因素相对与目标层的权重:

$W=(0.067\ 7,0.033\ 4,0.056\ 3,0.067\ 7,0.044\ 8,0.052\ 6,0.026\ 0,0.052\ 6,0.038\ 9,0.030\ 6,0.019\ 9,0.018\ 6,0.019\ 9,0.041\ 9,0.038\ 0,0.037\ 3,0.026\ 3,0.029\ 9,0.045\ 8,0.021\ 7,0.046\ 0,0.063\ 5,0.054\ 7,0.054\ 7,0.031\ 1)$。

从计算结果可以得出,各因素对天然气管网安全性影响的重要度如下所示:

$I_1>I_4>I_{22}>I_3>I_{23}>I_{24}>I_6>I_8>I_{21}>I_{19}>I_5>I_{14}>I_9>I_{15}>I_{16}>I_2>I_{25}>I_{10}>I_{18}>I_{17}>I_7>I_{20}>I_{11}>I_{13}>I_{12}$。

2.3 系统安全等级确定

首先对专家打分结果进行统计,得到各因素的评价矩阵(共邀请了 10 位专家进行打分,打分结果按照比例关系进行归一化处理),再依据公式(4)和表 3 求得各因素综合评判向量 B_i,将 B_i 进行组合得到系统的总评价矩阵 B,$B=(B_1,B_2,B_3,B_4,B_5)^{\mathrm{T}}$。某市天然气管网安全性综合评价结果见表 4。

$$B=\begin{vmatrix} 0.085\ 4 & 0.099\ 0 & 0.050\ 6 & 0.036\ 0 & 0.005\ 6 \\ 0.092\ 7 & 0.094\ 2 & 0.081\ 9 & 0.034\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.113\ 6 & 0.071\ 4 & 0.014\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.122\ 8 & 0.094\ 5 & 0.029\ 6 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{vmatrix}$$

利用公式(3)求得系统的安全评价矩阵 $C=(0.219\ 1,0.346\ 2,0.254\ 7,0.149\ 9,0.030\ 1)$,计算可得该市天然气管网系统安全总得分为 81.31。依据评价标准,该市的天然气管网系统的当前安全等级为“较好”。

经验证,基于本文所提出的 FAHP-FCE 模型进行的天然气管网风险评价结果与该市天然气管网当前状态一致,同时可以得到目前对该市天然气管网系统风险影响较大的因素有“领导安全意识”“安全规章制度”“安全教育和培训”“管网设计”和“管道完整性”。表明了这几个方面是影响该市天然气管网系统安全水平的主要因素,需要重点关注。

分析发现影响天然气管网安全的关键因素主要集中在人员因素和管理因素上,说明在当前阶段,加强人员安全意识培养和提高管理水平更能降低天然气管网的风险水平。

表 4 某市天然气管网安全性综合评价

准则层		指标层		评价情况 R_i					B_i	W
因素	权重	因素	权重	好	较好	中	较差	差		
D_1	0.270	I_1	0.250 9	0.4	0.4	0.2	0.1	0	$B_1=(0.085\ 4,0.099\ 0,0.050\ 6,0.036\ 0,0.005\ 6)$	0.067 7
		I_2	0.123 6	0.4	0.2	0.2	0.2	0		0.033 4
		I_3	0.208 5	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1		0.056 3
		I_4	0.250 9	0.3	0.3	0.3	0.1	0		0.067 7
		I_5	0.166 0	0.3	0.5	0.1	0.1	0		0.044 8
D_2	0.301	I_6	0.174 8	0.2	0.3	0.4	0.1	0	$B_2=(0.092\ 7,0.094\ 2,0.081\ 9,0.034\ 0,0.000\ 0)$	0.052 6
		I_7	0.086 3	0.3	0.3	0.3	0.1	0		0.026 0
		I_8	0.174 8	0.2	0.4	0.3	0.1	0		0.052 6
		I_9	0.129 1	0.3	0.4	0.1	0.2	0		0.038 9
		I_{10}	0.101 7	0.4	0.2	0.3	0.1	0		0.030 6
		I_{11}	0.066 2	0.4	0.3	0.2	0.1	0		0.019 9
		I_{12}	0.061 8	0.5	0.3	0.2	0.1	0		0.018 6
		I_{13}	0.066 2	0.3	0.4	0.2	0.1	0		0.019 9
		I_{14}	0.139 1	0.4	0.2	0.3	0.1	0		0.041 9
D_3	0.199	I_{15}	0.191 2	0.4	0.5	0.1	0	0	$B_3=(0.113\ 6,0.071\ 4,0.014\ 0,0.000\ 0,0.000\ 0)$	0.038 0
		I_{16}	0.187 2	0.6	0.4	0	0	0		0.037 3
		I_{17}	0.132 1	0.7	0.2	0.1	0	0		0.026 3
		I_{18}	0.150 2	0.5	0.4	0.1	0	0		0.029 9
		I_{19}	0.230 1	0.6	0.3	0.1	0	0		0.045 8
		I_{20}	0.109 2	0.7	0.3	0	0	0		0.021 7
D_4	0.250	I_{21}	0.184 1	0.5	0.3	0.2	0	0	$B_4=(0.122\ 8,0.094\ 5,0.029\ 6,0.000\ 0,0.000\ 0)$	0.046 0
		I_{22}	0.254 1	0.6	0.3	0.1	0	0		0.063 5
		I_{23}	0.218 7	0.5	0.4	0.1	0	0		0.054 7
		I_{24}	0.218 7	0.4	0.5	0.1	0	0		0.054 7
		I_{25}	0.124 4	0.4	0.4	0.1	0	0		0.031 1

3 结 论

本文主要针对天然气管网安全系统具有多层次、多因素、复杂性的特点，提出基于 FAHP-FCE 模型的风险综合评价模型。基于该模型既能定量评价系统的总体安全状态，同时又能找出影响系统安全的主要因素，为天然气管网安全管理人员提供科学指导。最后论文以某市天然气管网为例，从人、机、环、管 4 个方面多方位进行了综合分析，分析结果与实际状态一致，验证了模型的实用性。

参 考 文 献

[1] 战训. 吉林省松原市“7·4”燃气管道泄漏爆炸救援解析. [J]. 中国消防，2018(8)：61-64.

[2] CHUN HUNG CHEN, YEONG NAIN SHEEN, HER YUNG WANG. Case analysis of catastrophic underground pipeline gas explosion in Taiwan[J]. Engineering failure analysis, 2016(65)：39-47.

[3] JUNKEON AHN, DAE JUN CHANG. Fuzzy-based HAZOP study for process industry[J]. Journal of hazardous materials, 2016(317)：303-311.

[4] 张继旺，马庆春，张来斌. 基于 FTA-BN 模型的城市燃气管道失效风险分析[J]. 北京石油化工学院学报，2014(3)：32-36.

[5] 张攀科，罗帆. 水上机场航道冲突风险机制的 FTA-BN 建模[J]. 中国安全科学学报，2018，28(9)：177-182.

[6] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学，2000，4(2)：80-88.

[7] PAULO H D S, SANDRA M N, DANIELE O S. The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications [J]. Journal of cleaner production, 2019(212)：119-138.

(下转第 59 页)

探开发投资的有效性,提高企业效益。

其次,通过信息化技术手段提升工作效率,支撑环保管理。环保管理人员和勘探开发业务人员在网上即可通过环境敏感因素识别系统对勘探开发部署方案进行批量的环境敏感因素识别与分析,系统能够自动输出环境敏感因素分析报告,给出明确的法律法规条款要求,通过地理信息系统清晰地标明允许建设区域、限制建设区域和禁止建设区域,从而大大缩短了环境勘查的周期,提高了工作效率,有利于避免违规作业,减少环境风险事件的发生概率,有效地支撑了企业环保业务管理。

最后,基于生态红线、法律法规数据分析,辅助顶层决策。环境敏感因素识别系统为勘探开发新区建立完整的敏感目标信息库,系统收集、入库了 20 多个省、市、自治区敏感因素目标及其监管法律法规数据,并通过地理信息系统的可视化手段展示矿权区域受生态红线的影响情况,从而辅助主管部门和油气田企业对矿权区块的退出、置换和勘探开发投资进行决策。

4　结束语

环境敏感因素识别系统将中国石化勘探开发矿权区域环境敏感因素识别与评估成果和地理信息平台进行有效的信息整合,有利于在勘探方案部署阶段及时了解各类环境敏感目标的管理要求,针对性地提出环境保护对策建议,为中国石化各企业勘探开发方案的调整、完善和实施提供环保决策依据;规避油气勘探开发生产过程中可能面临的环境风险和投资风险,使环保管理具有前瞻性,做到依法合规生产,助力企业有效践行“生态文明建设”的坚定实践者和推动者的角色。

参 考 文 献

[1] 卜伟,黄洪,王权.信息共享平台在环境管理中的支撑作用[J].新疆环境保护,2008,30(1):46-48.

[2] 刘忠瑞.环境信息资源共享平台的顶层设计实现[J].信息技术与信息化,2014(4):101-102.

[3] 万军明.环境敏感区在环境影响评价分类管理中的应用[J].环境工程,2009,27(增刊 1):504-507.

[4] 杨春.石油勘探开发对巴州生态环境影响及相关措施初探[J].新疆环境保护,1998(2):25-28.

[5] 李博.环境敏感区内进行地震勘探作业的探索与实践[J].中国安全生产科学技术,2014,10(增刊 2):196-199.

[6] 牛莹,刘亮.基于网络地图切片的地图服务实现与应用[J].测绘与空间地理信息,2015,38(12):162-164.

[7] 杨轶.PC 集群环境下地图切片的并行计算方法[J].测绘科学,2014,39(3):120-123.

(收稿日期　2019-02-27)
(编辑　郎延红)

(上接第 56 页)

[8] MARIE I, GENE H, JENNIFER M. Sensitivity analysis method to address user disparities in the analytic hierarchy process[J]. Expert systems with applications, 2017(90):111-126.

[9] VIKAS ACHARYA, SOMESH KUMAR SHARMA, SUNAND KUMAR GUPTA. Analyzing the factors in industrial automation using analytic hierarchy process [J]. Computers & electrical engineering, 2018(71):877-886.

[10] WU C, DOU L M, ZHANG M. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring [J]. Tunnelling and underground space technology, 2018(80):232-245.

[11] DA YANG, CHEUK MING MAK. An assessment model of classroom acoustical environment based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Applied acoustics, 2017(127):292-296.

[12] 隋楠,魏立新,隋溪.城市燃气管网风险评价体系研究[J].油气储运,2010,29(1):12-14.

[13] 张建秋.基于风险评价的城市燃气管网线路设计与开发[J].吉林化工学院学报,2014,31(3):99-102.

(收稿日期　2018-12-29)
(编辑　王 薇)