

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.019

# 油气长输管道综合评价模型设计与实现

王艳平<sup>1a,2</sup>, 曹树刚<sup>1a</sup>, 刘洪<sup>2</sup>, 孟繁琦<sup>1b</sup>, 梁平<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;  
b. 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院, 重庆 401331)

**摘要:** 现有的管道安全评价模型普遍采用专家打分法等主观性方法,但在确定权重时,受主观意识影响较为严重,存在评价结果与现场实际吻合度不高、评价结果不够全面等缺点。笔者针对油气长输管道安全评价实施现状及评价需求,在对油气长输管道安全评价目标和特点分析基础上,确定了油气长输管道的主要评价指标,应用模糊数学方法建立了油气长输管道综合评价模型,并对评价模型的关键技术进行分析,其中综合运用变异系数法、层次分析法进行量化分析准则层权重,通过建立优先关系矩阵和模糊一致矩阵的方法确定指标层权重。通过算例验证了所推出模型的可行性和准确性。

**关键词:** 油气长输管道;安全评价;权重;综合评价

中图分类号: TE980.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)11-121-06

## Design and implementation of comprehensive evaluation model for long distance oil-gas pipeline

WANG Yanping<sup>1a,2</sup>, CAO Shugang<sup>1a</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>, MENG Fanqi<sup>1b</sup>, LIANG Ping<sup>2</sup>

(1a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; 1b. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Existing pipeline safety evaluation models commonly use the subjective methods such as the expert evaluation method, but the subjective consciousness has serious influence on the determination of index weight. Therefore, the match degree of the evaluation and the real condition is low and the evaluation result lacks of comprehensiveness. This paper determines the major evaluation index of long-distance oil-gas pipelines through the analysis of the goals and features of the safety evaluation. Fuzzy mathematics method is applied to build the comprehensive evaluation model of long-distance oil-gas pipelines and to analyze the key technology of the evaluation model. Variation coefficient method and analytic hierarchy process are comprehensively utilized to make a quantitative analysis of the criteria layer weight, and preferential relation matrix and fuzzy consistent matrix are established to determine the index layer weight. Finally, some examples are given to verify the feasibility and accuracy of the proposed model.

**Key words:** long-distance oil-gas pipeline; safety evaluation; weight; comprehensive evaluation

收稿日期: 2013-06-02

基金项目: 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(kj111401)

作者简介: 王艳平(1979-),女,重庆科技学院讲师,重庆大学博士研究生,主要从事石油安全工程技术及安全评价工作。  
曹树刚(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) caosg@cqu.edu.cn。

近年来,中国油气管道建设蓬勃发展,全国性的油气管道输送网络已经开始形成。随着长输管道建设量的增大,老管线服役时间的增长,管道事故也日益增多,为确保油气长输管道的安全,使新管道无故障运行、老管道在设计寿命内继续健康安全运行,对长输管道开展安全性评价是非常必要的。

国内外不少石油公司综合运用多种风险分析方法开发了管道的安全评价模型,加拿大、美国等发达国家管线安全评价中广泛使用美国管道风险管理专家 W. Kent Muhlbauer<sup>[1]</sup>提出的专家打分法<sup>[2-4]</sup>。国内的管道安全评价也主要以专家打分法为主,该方法中基本没有客观概率的计算,也没有考虑安全管理因素的影响<sup>[5-8]</sup>。目前世界各国都力图使管道安全评价技术沿着量化、精确化、智能化的方向发展。加拿大 C-FFR 公司开发了管道维护和检测的风险分析软件包(PIRAMID),用于管道的失效概率分析、失效后果和总风险计算。中国在借鉴 PIRAMID 技术基础上,也开发了 TGRC-RISK 管道定量安全评价软件,实现管线系统的风险排序<sup>[9]</sup>。但分析过程较为复杂,而且需要大量的统计数据做支撑。如何最大限度地降低安全评价的主观性,合理利用管道监测数据,一直是管道安全评价技术领域的研究热点,且尚没有成熟的理论与应用技术。笔者在总结前人建模经验的基础上,结合国内油气长输管线的特点,首先对管道的潜在危险有害因素进行详细识别,建立油气长输管道评价指标,利用模糊综合评价处理管道复杂影响因素的优越性<sup>[10]</sup>,使油气长输管道系统的评价在主观和客观上相对统一,量化一些难以回避的模糊概念,采用主客观相结合的方法确定指标权重,建立更为全面客观,科学可行的模糊综合评价模型进行安全评价并加以应用。

## 1 油气长输管道主要评价指标确定

管道安全评估国际标准化组织发布的 ISO13623/2000“石油及天然气管道输送系统”管理规范要求根据 5 类事故根源,对设计、施工或操作失误,材料或零件损坏、腐蚀、第三方活动、自然灾害所引发的事故频率及危害性进行评价和风险计算。笔者在实地调查研究、查找国内外相关法律法规、文献及事故统计资料的基础之上<sup>[11-15]</sup>,建立了油气长输管道安全评价指标体系。从腐蚀、外部干扰、误操作、设计与材料、自然灾害和安全管理等 6 大类分析导致长输管道失效的主要影响因素,每一类指标又包含许多单项评价指标,如外部干扰中的“最小埋深”、“公众教育程度”、“管道附近活动水平”等,其评

价指标体系见表 1 所示。

表 1 油气长输管道安全评价指标体系

目标层	准则层评价指标 $U_i$	指标层评价子指标 $u_{ij}$
腐蚀 $U_1$		内腐蚀 $u_{11}$
		外腐蚀 $u_{12}$
		腐蚀检测 $u_{13}$
外部干扰 $U_2$		最小埋深 $u_{21}$
		公众教育程度 $u_{22}$
		管道附近活动水平 $u_{23}$
设计与材料 $U_3$		安全防护设计 $u_{31}$
		管材质量 $u_{32}$
误操作 $U_4$		人员素质 $u_{41}$
		责任态度 $u_{42}$
		不安全心理 $u_{43}$
自然灾害 $U_5$		破坏性地震 $u_{51}$
		地质地理灾害 $u_{52}$
安全管理 $U_6$		安全培训教育 $u_{61}$
		安全组织机构 $u_{62}$
		安全规章制度 $u_{63}$
		安全监督管理 $u_{64}$

## 2 评价模型的建立

### 2.1 建立因素集及评价集

根据油气长输管道安全评价指标体系,组成因素集: $U=(U_1, U_2, \dots, U_6)$ ,  $U_i=(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij})$ 。根据评价对象性质,评价集分为 5 个等级,即  $V=\{\text{好, 较好, 中, 较差, 差}\}$ , 记为  $V=\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}=\{95, 80, 65, 45, 30\}$ 。

### 2.2 确定评价因素的权重

#### 2.2.1 准则层权重的求解

1) 变异系数法求准则层权重  $W_1$ 。根据管道失效统计数据确定风险因素权重,假设在长  $L(\text{km})$  的管道上,  $N$  年时间里出现事故总数为  $M$  次<sup>[16-17]</sup>。

$$\text{风险频率: } r = \frac{M}{(NL)}; \quad (1)$$

$$\text{对应的风险概率为: } P(i) = 1 - e^{-r}. \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间;  $P$  为风险概率。

则各项指标的权重为:

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}. \quad (3)$$

2) 层次分析法求准则层权重  $W_2$ 。利用层次分析法,对同一层的指标进行两两对比,并按其重要程度评定等级。 $a_{ij}$  为  $i$  元素比  $j$  元素的重要性等级,按两两相比较结果构成的矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$ ,称  $A$  为判断矩阵。判断矩阵的特点是  $a_{ij} > 0, a_{ii} = 1$  且  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。关于  $a_{ij}$  值的确定引用数字 1~9 及其倒数作为标度,表 2 为 1~9 标度的含义。

表 2 重要度标度表

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

判断矩阵  $A=[a_{ij}]$  的最大特征值为  $\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $W_2$  为权重向量,需检验判断矩阵是否符合一致性原则。判断矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  为完全一致矩阵时,  $\lambda_{\max} = n$ ; 若不一致,则  $\lambda_{\max} > n$ , 判断矩阵的偏差一致性指标为  $CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}$ ,  $n$  为判断矩阵  $A$  的维数。为衡量不同的矩阵是否具有满意的一致性,还需要引入判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 值, RI 值可查表 3 获得。

表 3 RI 值表

矩阵维数 $n$	RI	矩阵维数 $n$	RI
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

随机一致性比率为  $CR = \frac{CI}{RI}$ , 若  $CR < 0.1$ , 认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则应对判断矩阵进行调整。

通过上述求取权重的过程可以看出, 变异系数法所求准则层权重完全是由统计数据计算得到的, 客观性强。但是, 由于确定各项指标的权重需要综合考虑评价对象的社会属性等因素, 故综合变异系数法和层次分析法, 准则层权重为:

$$W = aW_1 + (1-a)W_2. \quad (4)$$

式中:  $a$  为调整主客观因素比例, 且  $0 \leq a \leq 1$ 。可以根据油气长输管道的实际运营状况听取专家的意见确定。

### 2.2.2 指标层权重的求解

1) 建立模糊优先关系矩阵。设第  $i$  个准则层指标  $U_i$  第  $j$  个子指标为  $u_{ij}$ , ( $i=1, 2, 3, \dots, 6; j=1, 2, 3, \dots, n$ ), 将  $u_{ij}$  针对上层指标的相对重要性两两比较建立优先关系矩阵, 即

$$D = (d_{kj})_{n \times n}. \quad (5)$$

若  $u_{ik}, u_{ij}$  ( $k, j=1, 2, \dots, n$ ) 相对重要性相同, 则  $d_{kj} = 0.5$ ; 若  $u_{ik}$  相对重要性优于  $u_{ij}$ , 则  $d_{kj} = 1.0$ ; 若  $u_{ik}$  相对重要性劣于  $u_{ij}$ , 则  $d_{kj} = 0.0$  [18]。

2) 建立模糊一致判断矩阵。将模糊优先关系矩阵  $D$  按行求和, 记作:

$$C_i = \sum_{j=1}^n d_{kj}, (i = k = 1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

再令

$$C_{ij} = \frac{C_i - C_j}{2n} + 0.5, \quad (7)$$

建立模糊一致判断矩阵  $C=(C_{ij})_{n \times n}$ 。

将模糊集合理论与决策理论相结合, 依据模糊一致判断矩阵的性质, 求准则层指标  $U_i$  的各子指标权重, 公式如下:

$$k_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} - 0.5, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

$$\omega_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}. \quad (10)$$

式中:  $\omega_i$  为  $U_i$  的各子指标权重。

### 2.3 一阶模糊综合评价

即对准则层指标  $U_i$  的所有子指标进行模糊综合评价, 其评价矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} u_{i11} & u_{i12} & u_{i13} & u_{i14} & u_{i15} \\ u_{i21} & u_{i22} & u_{i23} & u_{i24} & u_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{ij1} & u_{ij2} & u_{ij3} & u_{ij4} & u_{ij5} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $u_{ijk}$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6; j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, 3, 4, 5$ ) 为评价对象  $u_{ij}$  对评价集  $V$  中第  $k$  个元素的隶属度。

设  $a_{ij}$  为  $u_{ij}$  的权重, 则子指标权重集  $\omega_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ , ( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ )。

由模糊数学可知, 一阶综合评价模型为

$$B_i = \omega_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}). \quad (12)$$

### 2.4 二阶模糊综合评价

即对准则层指标进行评价, 其评价矩阵为

$$R = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5 \ B_6]^T. \quad (13)$$

又设  $a_i$  为准则层指标  $U_i$  的权重, 则准则层指标权重集  $W = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$ 。

二阶模糊综合评价模型为

$$B = WR = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5). \quad (14)$$

### 2.5 模糊综合评价结果

$$\text{设 } y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n, \quad (15)$$

式中:  $y$  为整个系统的安全评价总分数;  $b_i$  为各个指标的模糊综合评价系数;  $x_n$  为各个指标的安全等级得分。根据整个系统的安全评价总分数, 可以判断该管道运行的状况, 从而确定应该采取的安全对策措施。

## 3 评价应用示例

某管道自投产以来, 发生了多次腐蚀穿孔和第三方破坏事故。表 4 为该管道连续 5 年的失效事故统计及根据此项统计数据计算的不同类别失效事故风险概率。

表 4 管道连续 5 年管道事故统计

事故类别	次数	频率/ (次 · (km · a) <sup>-1</sup> )	风险 概率/‰
腐蚀	3	0.003 3	16.37
外部干扰	2	0.002 2	10.94
设计/材料	1	0.001 1	5.48
误操作	1	0.001 1	5.48
自然灾害	0.5	0.000 6	3.00
安全管理	0.5	0.000 6	3.00

### 3.1 权重的确定

#### 3.1.1 准则层权重的计算

根据表 4 及式(1)~(3), 得到变异系数法计算各项指标的权重:  $W_1 = (0.369 7, 0.247 1, 0.123 8, 0.123 8, 0.067 8, 0.067 8)$ 。

利用层次分析法, 建立成对比较矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7/5 & 7/3 & 7/2 & 7/1 & 7/3 \\ 5/7 & 1 & 5/3 & 5/2 & 5 & 5/3 \\ 3/7 & 3/5 & 1 & 3/2 & 3 & 1 \\ 2/7 & 2/5 & 2/3 & 1 & 2 & 2/3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 3/7 & 3/5 & 1 & 3/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

这里, 用 MATLAB 进行一致性检验,  $CR = \frac{CI}{RI} =$

$0.00 < 0.1$ , 由于篇幅所限, 检验过程文章未列出。根

据 2.2 节, 层次分析法求得权重向量, 经过归一化处理得:  $W_2 = (0.333 3, 0.238 1, 0.142 9, 0.095 2, 0.047 6, 0.142 9)$ 。

根据式(4), 取  $\alpha = 0.5$ , 得准则层权重  $W = (0.351 5, 0.242 6, 0.133 4, 0.109 5, 0.057 7, 0.105 3)$ 。

#### 3.1.2 评价指标层的权重

由 15 位专家对该油气长输管道的各级评价指标进行全面的现场调查与分析, 根据式(5)得到如下优先关系矩阵, 见表 5~10。

表 5  $U_1$  的优先关系矩阵

	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$
$u_{11}$	0.5	1.0	0.5
$u_{12}$	0.0	0.5	0.0
$u_{13}$	0.5	1.0	0.5

表 6  $U_2$  的优先关系矩阵

	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$
$u_{21}$	0.5	0.5	0.0
$u_{22}$	0.5	0.5	0.0
$u_{23}$	1.0	1.0	0.5

表 7  $U_3$  的优先关系矩阵

	$u_{31}$	$u_{32}$
$u_{31}$	0.5	0.5
$u_{32}$	0.5	0.5

表 8  $U_4$  的优先关系矩阵

	$u_{41}$	$u_{42}$	$u_{43}$
$u_{41}$	0.5	0.5	0.5
$u_{42}$	0.5	0.5	0.5
$u_{43}$	0.5	0.5	0.5

表 9  $U_5$  的优先关系矩阵

	$u_{51}$	$u_{52}$
$u_{51}$	0.5	0.5
$u_{52}$	0.5	0.5

表 10  $U_6$  的优先关系矩阵

	$u_{61}$	$u_{62}$	$u_{63}$	$u_{64}$
$u_{61}$	0.5	1.0	1.0	0.5
$u_{62}$	0	0.5	0.5	0
$u_{63}$	0	0.5	0.5	0
$u_{64}$	0.5	1.0	1.0	0.5

根据式(6)~(10)计算及归一化处理,可得到各子指标权重值: $\omega_1=(0.4167,0.1666,0.4167)$ ;  
 $\omega_2=(0.2500,0.2500,0.5000)$ ; $\omega_3=(0.5,0.5)$ ;  
 $\omega_4=(0.334,0.333,0.333)$ ; $\omega_5=(0.5,0.5)$ ; $\omega_6=(0.333,0.167,0.167,0.333)$ 。

### 3.2 模糊综合评价

根据 2.3 节,由专家和现场工作人员对各级评价指标进行全面的现场调查与分析,确定子指标评价矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.500 & 0.200 & 0.200 & 0.100 & 0 \\ 0.600 & 0.200 & 0.200 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (17)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.700 & 0.200 & 0 & 0.100 & 0 \\ 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (18)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.700 & 0.200 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (19)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.600 & 0.300 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.600 & 0.200 & 0.100 & 0.100 & 0 \end{bmatrix}, (20)$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.700 & 0.200 & 0.100 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (21)$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0.800 & 0.100 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.700 & 0.200 & 0 & 0.100 & 0 \\ 0.800 & 0.100 & 0 & 0 & 0.100 \\ 0.900 & 0.100 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. (22)$$

根据式(11)~(12),求得各准则层评价矩阵并进行归一化处理,准则层评价矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.6667 & 0.1583 & 0.1583 & 0.0167 & 0 \\ 0.7750 & 0.1250 & 0.0750 & 0.0250 & 0 \\ 0.75 & 0.15 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6666 & 0.2001 & 0.1000 & 0.0333 & 0 \\ 0.75 & 0.15 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.8166 & 0.1167 & 0.0333 & 0.0167 & 0.0167 \end{bmatrix}. (23)$$

则根据式(13)~(14),二阶模糊综合评价为:

$$B = W \times R =$$

$$(0.7247, 0.1488, 0.1074, 0.0173, 0.0018).$$

由式(15)求得长输管道安全评价系统的总得分为:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 = 88.56. (24)$$

式中, $y$ 表示整个评价系统的总得分。 $y$ 值越大,整个长输管道系统就越安全,风险就越小,事故发生的概率就越小。该长输管道安全评价得分为 88.56,得分在 80~95 之间,因此该管道安全等级属于较好。

## 4 结 语

油气长输管道是国家能源的重要运输工具,保障管道的安全生产运行,对于国家能源安全十分重要。定期对长输管道进行安全评价,及时掌握管道运行中存在的各类安全隐患,并进行治理整改,是保障长输管道安全的重要手段,也是一项基础性工作。油气管道安全评价与管理在我国还处于研究阶段,理论和方法还不成熟,结合国内外油气管道的安全评价现状,得出以下几点意见:

1)将安全管理等相关指标纳入油气长输管道安全评价体系,合理地建立了油气长输管道安全评价指标。

2)基于模糊数学评价方法建立油气长输管道系统模糊综合评价模型,同时,采用变异系数法、层次分析法主客观相结合求取准则层权重,通过建立优先关系矩阵和模糊一致矩阵求取指标层权重,能较好地解决以往的权重值受人为因素影响过大的问题,也减小了仅仅依靠统计数据确定的指标权重与实际情况相差较大的影响,评价结果更可靠。

### 参考文献:

- [1] Muhlbauer W K. Pipeline risk management manual: ideas, techniques and resources[M]. Houston, USA: Gulf Publishing Company, 1996: 73-77.
- [2] Kishawy H A, Gabbar H A. Review of pipeline

- integrity management practices [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, 87(7): 373-380.
- [3] Gharabagh M J, Asilian H, Mortasavi S B, et al. Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(4): 533-539.
- [4] Dey P K. An integrated assessment model for cross-country pipelines [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2002, 22(6): 703-721.
- [5] 张哲, 吕明晏, 汪是洋. 肯特评分法在输油管道风险评价中的应用及改进[J]. *化工生产与技术*, 2011, 18(1): 59-61.  
ZHANG Zhe, Lü Mingyan, WANG Shiyang. Application and corrective of Muhlbauer assessment method in oil pipeline risk assessment[J]. *Chemical Production and Technology*, 2011, 18(1): 59-61.
- [6] 吕奎, 孔益平, 周宇. 天然气管道风险分析及应急管理[J]. *安全与环境工程*, 2012, 19(2): 117-123.  
Lü Kui, KONG Yiping, ZHOU Yu. Risk analysis and emergency management of natural gas pipelines[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2012, 19(2): 117-123.
- [7] 刘国志, 彭英伟, 伍东. 天然气管道失效分析与防范对策[J]. *安全与环境工程*, 2012, 19(3): 100-104.  
LIU Guozhi, PENG Yingwei, WU Dong. Natural gas pipeline failure analysis and precautions[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2012, 19(3): 100-104.
- [8] 马志祥. 油气长输管道风险管理[J]. *油气储运*, 2005, 24(2): 1-7.  
MA Zhixiang. Risk management of oil and gas long-distance pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2005, 24(2): 1-7.
- [9] 赵新伟, 李鹤林, 罗金恒, 等. 油气管道完整性管理技术及其进展[J]. *中国安全生产科学技术*, 2006, 16(1): 129-135.  
ZHAO Xinwei, LI Helin, LUO Jinheng, et al. Managerial technique for integrity of oil and gas pipeline and its progress[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2006, 16(1): 129-135.
- [10] 李明, 陈洪凯. 隧道健康动态评价模型与应用[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(2): 142-148.  
LI Ming, CHEN Hongkai. Study on dynamic assessment model and its application to tunnel health[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(2): 142-148.
- [11] Sklavounos S, Rigas F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(1): 24-31.
- [12] Jo Y D, Ahn B J. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 123(1/2/3): 1-12.
- [13] Dziubiński M, Fr? tczak M, Markowski A S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5): 399-408.
- [14] Hu J Q, Zhang L B, Liang W. An adaptive online safety assessment method for mechanical system with pre-warning function[J]. *Safety Science*, 2012, 50(3): 385-399.
- [15] Lecchi M. Evaluation of predictive assessment reliability on corroded transmission pipelines [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2011, 3(5): 633-641.
- [16] Han Z Y, Weng W G. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(1/2): 509-518.
- [17] 帅健, 党文义, 狄彦. 输油管道的风险评价[J]. *油气储运*, 2009, 28(2): 5-9.  
SHUAI Jian, DANG Wenyi, DI Yan. Risk assessment of a petroleum transportation pipeline in service[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2009, 28(2): 5-9.
- [18] 金菊良, 杨晓华, 魏一鸣. 基于模糊优先关系矩阵的系统评价方法[J]. *系统工程理论方法应用*, 2005, 14(4): 364-368.  
JIN Juliang, YANG Xiaohua, WEI Yiming. System evaluation method based on fuzzy preferential relation matrix[J]. *Systems Engineering-theory Methodology Applications*, 2005, 14(4): 364-368.

(编辑 郑洁)