

天然气管道失效可能性灰色多层次分析

刘江波¹ 史书朋² 李莎³ 孙恒博³ 孟媛⁴

摘要: 针对天然气管道风险评价中失效可能性分析方法的不足,按系统工程的基本原理和工程实际,对油气管道的危险因素进行分析,建立了管道失效可能性风险因素层次结构图。运用层次分析和灰色理论,建立了基于灰色多层次的管道失效可能性分析模型,并运用建立的模型对国内某长输管道进行了实例计算。计算结果表明,该管道的风险值为3.3881,风险等级为一般。该管道需要引起有关部门的关注,并根据风险因素进行检查,以降低风险。

关键词: 天然气管道;失效可能性;风险因素;AHP分析;灰色理论

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.8.033

Assessment of the Likelihood of Gas Pipeline Failure with Multi-level Grey Method

Liu Jiangbo, Shi Shupeng, Li Sha, Meng Yuan

Abstract: Aiming at the problem of risk assessment of natural gas pipeline failure probability analysis method, according to the system engineering basic principles and practical engineering, risk factors of oil and gas pipeline were analyzed, set up the pipeline failure probability risk factor hierarchical graph. Based on the analytic hierarchy process and grey theory, a pipeline failure probability analysis model is established based on grey level, and the model is used to calculate the long pipeline in China. The calculated results show that the pipeline's risk value is 3.3881, the risk level is general. The pipeline needs to attract the attention of the relevant departments, and according to the risk factors for inspection, to reduce its risk.

Key words: natural gas pipeline; failure likelihood; risk factor; AHP analysis; grey theory

天然气管道输送的是易燃、易爆介质,发生事故后破坏性大,对社会影响范围广,因此天然气管道安全问题备受关注。管道系统风险由失效可能性和发生事故的后果两部分构成,对管线进行失效可能性分析具有重要的现实意义^[1]。目前国内对管道失效可能性分析主要沿袭了肯特评分法,其中应用较多的为模糊综合评价法。模糊综合评价法能够较好地解决模糊的、难以量化的不确定问题,但步骤繁琐,对数学知识要求较高。

灰色分析是指基于灰色系统的理论和方法,针对预定的目标对评价对象在某一阶段所处的状态做出分析。灰色分析可以多层次处理,分析过程可以循环进行,前一过程的分析结果可以作为后一过程分析的输入数据^[2]。进行多层次的灰色分析可以满足复杂系统的分析要求,因此本文采用多层次灰色

分析法对管道失效可能性进行分析。

1 失效可能性的多层次灰色模型

1.1 管道风险因素分析

管道风险因素分析的目的是从整体上把握造成管道失效的各种因素,为管道失效可能性分析提供依据。影响管道安全性的因素主要有第三方破坏、腐蚀、设计原因和误操作。

1.2 管道失效可能性风险因素层次体系

建立油气管道失效因素层次体系应遵循科学性、全面性、可行性的原则。考虑到油气管道的特点和国内油气管道勘察、设计、施工和运行管理水平,本文结合具体情况给出了天然气管道失效风险因素层次结构图(图1)。该体系以第三方破坏、腐蚀、设计原因和误操作原因作为油气管线失效可能性分析的一级风险因素,一级风险因素下设二

¹中国石油工程建设公司 ²青海油田公司生产运行处 ³青海油田采油一厂 ⁴青海油田采油二厂

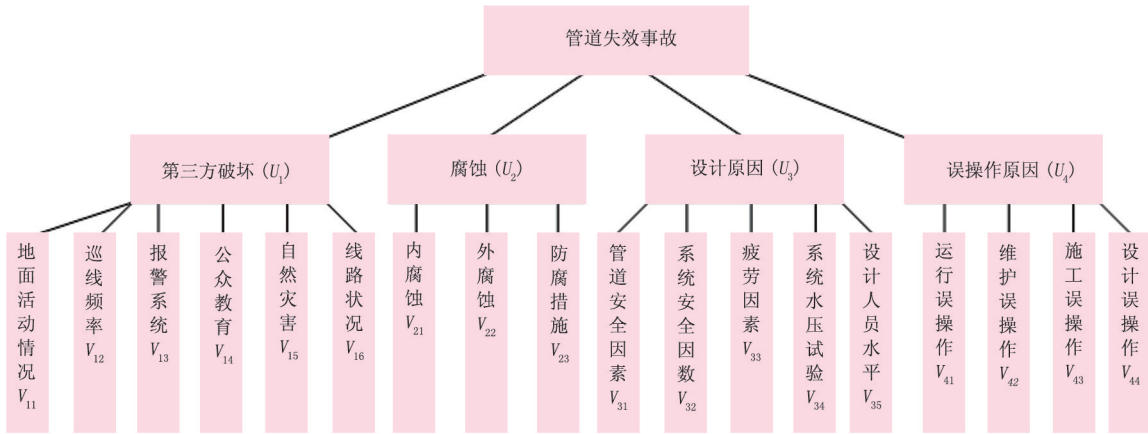


图1 管道失效风险因素层次结构

级因素。一级因素评价的集为 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ ，二级因素评价集为 $U_1 = \{V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14}, V_{15}, V_{16}\}$ ， $U_2 = \{V_{21}, V_{22}, V_{23}\}$ ， $U_3 = \{V_{31}, V_{32}, V_{33}, V_{34}, V_{35}\}$ ， $U_4 = \{V_{41}, V_{42}, V_{43}, V_{44}\}$ 。

管道系统的综合失效可能性由4个一级指标的失效可能性状况综合得到，而每个一级指标的失效可能性状况由其所属的所有二级指标的失效可能性状况综合得到，这个综合过程采用的是多层次灰色的方法。

1.3 确定因素的评分标准和失效可能性评价集

组织专家对主观指标进行评分前必须首先制定出指标评分标准和失效可能性等级，这样才能用统一的标准对主观指标进行量化。考虑人思维的最大可能分辨能力，本文将因素 U_{ij} 的状况由好到坏划分为5级，分别赋值5、4、3、2、1分，状况介于两评价语言之间时，相应的评分值分别为4.5、3.5、2.5、1.5分。表1列出了管道风险因素评分标准。

表1 分值与评价语言对应关系

分值	5	4	3	2	1
因素状况	好	较好	一般	较差	差

根据天然气管道失效的分级情况，确定失效可能性评价集为{低，较低，中等，较高，高}^[3]。

1.4 确定各因素权重

在失效可能性评价过程中，风险因素对管道失效的影响重要性度量值称为权重。在多层次评价中，各因素对管道失效的影响重要程度通常是不同的，权重的确定是否合理、科学直接影响着评价的准确性^[4-7]。本文利用AHP法确定评价因素的权重向量。

对于图1所示的天然气管道风险因素层次结构，设一级风险因素 $U_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 的权重系

数分别为 $u_i (i=1, 2, \dots, 4)$ ，且满足 $u_i \geq 0$ 及 $\sum_{i=1}^4 u_i = 1$ ，用于计算总失效可能性的风险因素权重向量记为 W ，则有 $W = (u_1, u_2, u_3, u_4)$ ；同样，设每个二级风险因素 V_{ij} 的权重系数 v_{ij} 满足 $v_{ij} \geq 0$ 及 $\sum_{i=1}^4 v_{ij} = 1$ 。计算一级风险因素 $U_i (i=1, \dots, 4)$ 的权重向量记作 W_{U_i} ，则 $W_{U_i} = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in_i})$ ， n_i 表示一级风险因素 U_i 中二级风险因素的个数。

1.5 建立样本矩阵

设评价者序号为 $K (K=1, 2, \dots, p)$ ，请评价者对风险因素 V_{ij} 按表1进行打分 (d_{ijk})，并填写评价者评分表，得到样本矩阵为

$$D_i = \begin{bmatrix} d_{i11} & d_{i12} & \dots & d_{i1p} \\ d_{i21} & d_{i22} & \dots & d_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{ijn} & d_{ij2} & \dots & d_{ijp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.6 建立白化权函数

由于专家存在认识和专业水平上的差异，只能给出一个灰数的白化值。为了真实地反映管道属于某类的程度，需要确定评价灰类的等级数、灰类的灰数及灰数的白化权函数^[8]。按风险值由低到高分为 $e (e=1, 2, \dots, g)$ 个评价灰类，则相对应的白化权函数如下

第一灰类 $e=1$ ，设定灰数 $\otimes_1 \in [0, 1, 2]$ ，白化权函数为 f_1

$$f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} 1 & d_{ijk} \in [0, 1] \\ (2 - d_{ijk})/1 & d_{ijk} \in [1, 2] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 2] \end{cases} \quad (2)$$

第二灰类 $e=2$ ，设定灰数 $\otimes_2 \in [0, 2, 4]$ ，白化权函数为 f_2

$$f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/2 & d_{ijk} \in [0, 2] \\ (4 - d_{ijk})/2 & d_{ijk} \in [2, 4] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 4] \end{cases} \quad (3)$$

同理，第 g 灰类 $e=g$ ，设定灰数 $\otimes g \in [0, g, 2g]$ ，白化权函数为 f_g

$$f_g(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/g & d_{ijk} \in [0, g] \\ (2g - d_{ijk})/g & d_{ijk} \in [g, 2g] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 2g] \end{cases} \quad (4)$$

1.7 灰色评价系数、权向量和权矩阵的计算

在风险因素中对因素 V_{ij} 属于第 e 个评价灰类的灰色评价系数记为 M_{ije} ，则有 $M_{ije} = \sum_{k=1}^p f_e(d_{ijk})$ 。对于评价因素 V_{ij} ，属于各个评价灰类的总灰色评价系数记为 M_{ij} ，则有 $M_{ij} = \sum_{e=1}^g \sum_{k=1}^p f_e(d_{ijk})$ 。两者的比值

$r_{ije} = \frac{M_{ije}}{M_{ij}}$ 反应了全部评价者认为因素 V_{ij} 属于第 e 个灰类的强烈程度，它被称为灰色评价权。由指标 V_{ij} 的所有评价权构成的向量 $R_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \dots, r_{ijg})$ 称为权向量。由此得到因素 U_i 所属因素 V_{ij} 对于各评价灰类的灰色评价权矩阵 $R_i = [R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ij}]^T$ 。

1.8 综合评价

对二级风险因素 V_{ij} 进行综合评价，其综合评价结果记为 B_i 。

$$B_i = W_{U_i} \times R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ig}) \quad (5)$$

由二级因素 V_{ij} 的综合评价结果 B_i 得到其所属因素 U_i 的灰色权系数矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1g} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2g} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{g1} & b_{g2} & \dots & b_{gg} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对一级风险因素 U_i 进行综合评价，其综合评价结果记为 B 。

$$B = W \times R = (b_1, b_2, \dots, b_g) \quad (7)$$

B 是用来描述风险因素 U_i 的综合灰类程度的向量，它还不能直接用于评价对象的排序。因此，还需做进一步处理，使其单值化，计算评价因素 U_i 的综合评价价值 $M^{[9]}$ 。将各灰类等级按“灰水平”赋值，则各评价灰类等级化向量 $C = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_g)$ ，本文取 $C = (5, 4, 3, 2, 1)$ 分别对应失效可能性评价集{低, 较低, 中等, 较高, 高}，则

$$M = B \times C^T \quad (8)$$

最后得到失效综合值 M ，由表2可得到管道的失效可能性状况。

表2 失效可能性等级分值

失效可能性	分值
低	5~4
较低	4~3
中等	3~2
较高	2~1
高	1~0

2 实例分析

为验证模型的有效性，对国内某长输管道某段管线进行研究。首先建立了如图1所示的管道风险因素层次结构图，然后应用该方法建立指标体系，并确定了指标权重。最后根据灰色理论进行综合评价，计算出综合评价值。其中专家打分情况：要求专家组人数最少为7人，去掉不合理的打分，留下5个专家所打的分值。专家打分标准为：不发生（4分），即因素导致事件发生概率为0次/年；很少发生（3分）为2~3次/年；时有发生（2分）为6~7次/年；经常发生（1分）为大于10次/年。

2.1 确定风险因素权重向量

根据层次分析法计算各层风险因素的权重，得到一、二级风险因素的权重如下

$$W = (u_1, u_2, u_3, u_4) = (0.375, 0.275, 0.150, 0.200) \quad (9)$$

$$W_{U_1} = (0.250, 0.200, 0.100, 0.150, 0.150, 0.150) \quad (10)$$

$$W_{U_2} = (0.350, 0.550, 0.100) \quad (11)$$

$$W_{U_3} = (0.250, 0.250, 0.200, 0.200, 0.100) \quad (12)$$

$$W_{U_4} = (0.400, 0.300, 0.200, 0.100) \quad (13)$$

2.2 组织专家对管道风险进行评分并建立样本矩阵

组织五位专家按表1进行评分，得到样本矩阵如下

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & 1 & 1 & 1 \\ 1.5 & 1 & 1 & 1.5 & 1 \\ 3 & 2.5 & 1.5 & 1.5 & 1.5 \\ 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 1.5 \\ 1 & 1.5 & 1.5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 2 & 1.5 & 2 & 2.5 & 1.5 \\ 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1 \\ 1.5 & 1 & 1.5 & 3 & 2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 1.5 & 1.5 & 2.5 & 2 & 1.5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1.5 & 2.5 & 1.5 \\ 1.5 & 1.5 & 3.5 & 1.5 & 2 \\ 1 & 1.5 & 1 & 1.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & 1 & 1 & 2.5 \\ 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1.5 \\ 1 & 1 & 1.5 & 1 & 1.5 \\ 1.5 & 1.5 & 1 & 1.5 & 1.5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.2804 & 0.2804 & 0.1869 & 0.1401 & 0.1122 \\ 0.2062 & 0.3093 & 0.2062 & 0.1546 & 0.1237 \\ 0.3419 & 0.2564 & 0.1709 & 0.1282 & 0.1026 \\ 0.2503 & 0.2921 & 0.1947 & 0.1460 & 0.1168 \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.3 计算灰色评价权矩阵

本评价设定五个灰类，应用公式(2)~(4)求得白化权函数值，然后用计算第三方破坏、腐蚀、设计、误操作原因所属因素对应各评价灰类的灰色评价权矩阵，分别如下

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.3893 & 0.2379 & 0.1586 & 0.1190 & 0.0952 \\ 0.3419 & 0.2564 & 0.1709 & 0.1282 & 0.1026 \\ 0.1169 & 0.2727 & 0.2597 & 0.1948 & 0.1558 \\ 0.2956 & 0.2745 & 0.1830 & 0.1372 & 0.1098 \\ 0.2062 & 0.3093 & 0.2062 & 0.1546 & 0.1237 \\ 0.3419 & 0.2564 & 0.1709 & 0.1282 & 0.1026 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.0788 & 0.3349 & 0.2495 & 0.1871 & 0.1497 \\ 0.2503 & 0.2921 & 0.1947 & 0.1460 & 0.1168 \\ 0.1594 & 0.2789 & 0.2390 & 0.1793 & 0.1434 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.1107 & 0.3690 & 0.2214 & 0.1660 & 0.1328 \\ 0.4378 & 0.2189 & 0.1462 & 0.1095 & 0.0876 \\ 0.3046 & 0.2475 & 0.1904 & 0.1432 & 0.1142 \\ 0.1200 & 0.2800 & 0.2400 & 0.2000 & 0.1600 \\ 0.3419 & 0.2564 & 0.1709 & 0.1282 & 0.1026 \end{bmatrix} \quad (20)$$

以灰色评价权矩阵以及专家的打分为依据(表3)，利用二级风险因素的权向量，计算出二级风险因素的评价结果分别为

$$B_1 = W_{v_1} \times R_1 = (0.3040 \quad 0.2641 \quad 0.1838 \quad 0.1379 \quad 0.1103) \quad (22)$$

$$B_2 = W_{v_2} \times R_2 = (0.1812 \quad 0.3058 \quad 0.2183 \quad 0.1637 \quad 0.1310) \quad (23)$$

$$B_3 = W_{v_3} \times R_3 = (0.2562 \quad 0.2781 \quad 0.1951 \quad 0.1503 \quad 0.1202) \quad (24)$$

$$B_4 = W_{v_4} \times R_4 = (0.2674 \quad 0.2854 \quad 0.1903 \quad 0.1445 \quad 0.1142) \quad (25)$$

2.4 综合评价

使用灰色理论方法进行最后的综合评价，得到最终的风险值。

表3 专家打分统计

专家	因素															
	管线线路情况 C_{11}	活动情况 C_{12}	地面设施 C_{13}	使用年限 C_{21}	管道应力变化 C_{22}	管材缺陷 C_{23}	人员因素 C_{31}	施工缺陷 C_{32}	维护过程失误 C_{33}	安全装置设计 C_{41}	管道内缺陷 C_{42}	防护措施问题 C_{51}	环境适宜 C_{52}	组成和配方 C_{61}	巡检因素 C_{62}	
a	2	2.5	3.5	1	3	3.5	2	4	3.5	3.5	2	3	3	3.5	3	
b	2	1.5	3.5	1.5	3	2.5	1	4	4	3.5	2	3	4	3.5	3	
c	2	2	3	1	3	3	1.5	3.5	3	3	2	3	3.5	4	2	
d	2.5	1.5	3.5	2	3.5	3	2	4	3	3	3	4	3.5	4	2	
e	2.5	2	3	1	3.5	3.5	2	3.5	3	3.5	2	4	3.5	4	3	

总灰色评价权矩阵为 $R = [B_1, B_2, B_3, B_4]^T$ ，因此管道失效可能性的综合评价结果为

$$B = W \times R = (0.3750, 0.2750, 0.1500, 0.2000) \times \begin{bmatrix} 0.3040 & 0.2641 & 0.1838 & 0.1379 & 0.1103 \\ 0.1812 & 0.3058 & 0.2183 & 0.1637 & 0.1310 \\ 0.2562 & 0.2781 & 0.1951 & 0.1503 & 0.1202 \\ 0.2674 & 0.2584 & 0.1903 & 0.1445 & 0.1142 \end{bmatrix} = (0.2557 \quad 0.2765 \quad 0.1963 \quad 0.1482 \quad 0.1183) \quad (26)$$

对评价结果进行单值化处理得失效可能性综合值 M 。

$$M = B \times C^T = 3.3881$$

该管道的风险值为 3.3881，风险等级为一般。该管道需要引起有关部门的关注，并根据风险因素进行检查，以降低风险。

3 结论

(1) 天然气管道由于自身和外界环境的特点，

在运行过程中存在多方面的隐患，安全评价是风险管理的有效方法。但单一的评价方法往往是针对某一特定方面，难以完全揭示整个系统的情况。常常需要采用多种评价方法进行综合评估，或者将不同的评价方法结合起来(AHP和灰色分析法将变权思想与灰色理论结合在一起)，以综合处理风险评价问题。

(2) 本文采用灰色多层次理论对某管道风险状况进行了分析。评价指标的选取不受指标种类和数量的限制，有效地解决了定性和定量指标共存的问题。最后计算得到了管道失效可能性综合值为 3.3881，由表2知本管道失效可能性处于较低级别。

(3) 针对多层次结构体系，建立灰色多层次综合评价模型。在灰色理论分析基础上建立的该模型，各指标的相对权重对评价结果的影响得到了充分考虑和体现，并把灰色评价和多 (下转第 117 页)