

文章编号: 1000-8241(2014)12-1301-06

基于区间直觉模糊数的管道失效概率评估

王瀚翎 付冬梅

北京科技大学自动化学院, 北京 100083

摘要: 失效概率评估是管道定量风险评估的关键。将区间直觉模糊数引入专家对管道失效可能性的评估中, 以便从支持、反对、犹豫 3 方面用区间的形式全面表述专家的评判信息; 在假定该区间直觉模糊数的区间记分函数服从正态分布的前提下, 定义了一种考虑信息使用者风险偏好的区间数点算子, 利用 D-S 证据理论和灰色关联分析实现多位专家评估信息的融合; 通过选取不同的风险偏好因子, 探讨失效事件发生概率及结构重要度排序的变化趋势, 在完善管道失效概率评估的同时, 降低了失效底事件集的不确定性。以管道焊接失效为例, 阐述了该失效概率评估方法, 并验证了其有效性。(图 1, 表 3, 参 19)

关键词: 油气管道; 失效概率; 区间直觉模糊数; D-S 证据理论

中图分类号: TE88

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.12.009

Assessment of pipeline failure probability based on interval-valued intuitionistic fuzzy number

WANG Hanling, FU Dongmei

School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083

Abstract: Failure probability assessment is the key of quantitative risk assessment of pipeline. The interval-valued intuitionistic fuzzy number (IVIFN) is introduced into the expert's assessment of failure probability in order to present the expert's conclusions comprehensively as regards to support, objection and hesitation in the form of interval. Assuming that the interval score function of the IVIFN is subject to normal distribution, an interval point operator is defined considering the risk appetite of information users. Assessment results of many experts are integrated using D-S evidence theory and grey relational analysis. Different risk appetite factors are selected to identify the trends of failure probability and priority of structural importance. Moreover, the assessment of pipeline failure probability is improved, while the uncertainty of failure event sources is reduced. In this paper, this method of failure probability assessment is used for a pipe welding failure, and its effectiveness is verified. (1 Figure, 3 Tables, 19 References)

Key words: oil and gas pipeline, failure probability, interval-valued intuitionistic fuzzy number (IVIFN), D-S evidence theory

油气管道安全运营关乎国家能源安全和公共安全^[1-2], 管道定量风险评估随着管道运输业的长足发展而日益受到重视^[3-4]。失效概率评估是管道定量风险评估的核心内容之一, 也是难点所在^[5]。在历史数据不充分或不能建立相应失效模型的情况下, 常根据业内专家的经验, 采用故障树模糊分析方法评估失效概率^[6-7]。具体做法: 首先邀请多位专家对故障树底事件作“大”“小”等模糊性语言评估, 然后用隶属度函数将其转化为精确的数值^[8], 另外可以直接邀请专家给出

精确的概率估计值^[9]。这两种处理方式均难以全面地表述专家不支持和犹豫的程度, 在融合各专家评判信息的过程中, 也没有考虑信息使用者的风险偏好, 且隶属度函数的选取尚无统一适用的规则^[10-11]。

考虑到认识的不确定性, 专家常倾向于采用区间的形式描述事件发生的可能性, 为避免传统描述专家主观评估的局限, 将区间直觉模糊数引入到专家评估过程中, 以便全面表述专家对底事件发生、不发生、可能发生概率的程度区间。在假定该区间直觉模糊数

的区间记分函数服从正态分布的基础上,定义了一种考虑信息使用者风险偏好的区间数点算子,而后通过D-S证据理论和灰色关联分析融合各专家的评估信息,得到各底事件的失效概率及结构重要度排序。在此基础上,通过选取不同的风险偏好因子,探究底事件发生概率和结构重要度排序的变化趋势。最后,以管道焊接失效为例,详细阐述了该评估方法的计算流程,得出评估结果与地区统计数据相符的结论。

1 区间直觉模糊数

设 X 为非空集合,称 $B = \{ \langle x, \mu_B(x), \nu_B(x) \rangle | x \in X \}$ 为直觉模糊集,其中 $\mu_B(x)$ 和 $\nu_B(x)$ 分别为 X 中元素 x 属于 B 的隶属度 $\nu_B(x): X \rightarrow [0, 1]$ 和非隶属度 $\mu_B(x): X \rightarrow [0, 1]$,且满足条件 $0 \leq \mu_B(x) + \nu_B(x) \leq 1, x \in X$,定义 $1 - \mu_B(x) - \nu_B(x)$ 为 X 中元素 x 属于 B 的犹豫度^[12]。

由于客观事物的复杂性以及认识的不确定性,直觉模糊集中的隶属度和非隶属度通常难以用精确的数值描述,而用区间描述较为合适^[13-14]。

设 X 为非空集合,称 $\bar{B} = \{ \langle x, \bar{\mu}_B(x), \bar{\nu}_B(x) \rangle | x \in X \}$ 为区间直觉模糊集^[14]。其中 $\bar{\mu}_B(x)$ 和 $\bar{\nu}_B(x)$ 分别为 X 中元素 x 属于 \bar{B} 的隶属度区间 $\bar{\mu}_B = [\bar{\mu}_B^l, \bar{\mu}_B^u] \subset [0, 1]$ 和非隶属度区间 $\bar{\nu}_B = [\bar{\nu}_B^l, \bar{\nu}_B^u] \subset [0, 1]$, $x \in X$,且满足条件 $\bar{\mu}_B^l < \bar{\mu}_B^u, \bar{\nu}_B^l < \bar{\nu}_B^u, \bar{\mu}_B^u + \bar{\nu}_B^u \leq 1$ 。显然,若 $\bar{\mu}_B^l(x) = \bar{\mu}_B^u(x)$ 且 $\bar{\nu}_B^l(x) = \bar{\nu}_B^u(x)$,则区间直觉模糊集退化为直觉模糊集。 X 中的元素 x 属于 \bar{B} 的隶属度和非隶属度组成的序列对 $(\bar{\mu}_B(x), \bar{\nu}_B(x))$ 称为区间直觉模糊数。

在此使用下列符号描述采用故障树分析方法进行管道失效概率评估所涉及的集合量:事件集 $A = \{ A_1, A_2, \dots, A_m \}$ 表示 m 个可能发生的互斥且穷举的事件,其中 A_i 表示第 i 个可能发生的事件,即故障树分析模式下的底事件所组成的集合。指标集 $I = \{ I_1, I_2, \dots, I_n \}$ 表示 n 个属性的集合 ($n \geq 2$),并假设这些属性是相互独立的,其中 I_j 表示第 j 个属性值,即故障树分析模式下的各专家所组成的集合。区间直觉模糊矩阵 $D = (d_{ij})_{m \times n}$,表示事件在属性下所发生的概率,其中 d_{ij} 表示事件 A_i 在属性 I_j 下所发生的概率,为一区间直觉模糊数,即故障树分析模式下各专家对底事件集中各事件发生概率区间直觉模糊数评判所组成的矩阵。

这里所要研究的内容就是根据已知的区间直觉模糊矩阵,在考虑风险偏好的同时,确定事件集中各事件的发生概率,并根据事件发生概率进行排序,从而得到影响管道失效各因素发生的概率及结构重要度排序。

2 基于区间直觉模糊数的管道失效概率评估

2.1 风险偏好因子下的正态分布区间数点算子

对于区间直觉模糊数 $\bar{\beta} = \langle \bar{\mu}_B(x), \bar{\nu}_B(x) \rangle$, $\bar{\beta}$ 的区间记分函数^[15]:

$$S(\bar{\beta}) = \bar{\mu}_B(x) - \bar{\nu}_B(x) \\ = [\bar{\mu}_B^l(x) - \bar{\nu}_B^u(x), \bar{\mu}_B^u(x) - \bar{\nu}_B^l(x)] \quad (1)$$

其中: $S(\bar{\beta}) \subset [-1, 1]$ 。

区间记分函数表示元素 x 属于 \bar{B} 的净支持程度区间,可以将区间直觉模糊矩阵 $D = (d_{ij})_{m \times n}$ 转换为区间记分函数矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times n}$,其中 $s_{ij} = [s_{ij}^l, s_{ij}^u]$ 为一区间数。

由中心极限定理可知,属性值落在区间的可能性趋于稳定,故认为属性值服从以区间中点为期望的正态分布更符合实际。

设 $\beta = [a, b]$ 为一区间数,若属性值 $r \in [a, b]$ 且服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$,则称区间 β 为正态分布区间数。由正态分布 3σ 原则 $P(r_{ij} \in [a_{ij}, b_{ij}]) = 0.9974$ 可知,期望和方差分别为^[16]:

$$\begin{cases} \mu = (a+b)/2 \\ \sigma = (b-a)/6 \end{cases} \quad (2)$$

设区间记分函数 $s_{ij} = [s_{ij}^l, s_{ij}^u]$ 为一正态分布区间,则其区间数点算子 g_{ij} 可由下式确定:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{s_{ij}^l}^{s_{ij}^u} \exp \left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt = \frac{\alpha+1}{2} \quad (3)$$

其中: $\alpha \in [-1, 1]$ 为风险偏好因子,当 $\alpha > 0$ 为风险偏好型;当 $\alpha < 0$ 为风险规避型。特别地,当 $\alpha = 0$ 表明风险中立型;当 $\alpha = 1$ 表明完全接受风险;当 $\alpha = -1$ 表明完全规避风险。

风险偏好因子 α 的选取,可以根据信息使用者本身的风险偏好确定,也可以通过选择不同的风险偏好因子探讨底事件发生概率和结构重要度排序的变化趋势。

在已知风险偏好因子的前提下,可以通过式(3)将区间数转换为实数 $s_{ij} = [s_{ij}^l, s_{ij}^u]$ 。

2.2 基于 D-S 证据理论和灰色关联分析的信息融合

D-S 证据理论提供了一种多属性证据的融合法则,能够融合多个证据源提供的证据信息^[17],其建立在一个非空集合 U 上, U 称为辨识框架,由互斥且穷举的基本命题构成的有限集组成,在幂集 2^U 上定义 mass 函数(基本概率分配)为映射 $m:2^U \rightarrow [0,1]$,且满足条件 $m(\emptyset)=0$ 和 $\sum_{A \in U} m(A)=1$,若有 $m(A) > 0$,则称 A 为焦元。mass 函数实际上是对各种假设的评价权值,也是 D-S 证据融合的主要数据源; $\forall A \in U$, $\text{bel}(A) = \sum_{B \subset A} m(B)$,称 $\text{bel}(A)$ 为 A 的信任函数,表示 A 中每个子集的基本概率分配值之和。

设 bel_1 与 bel_2 为同一辨识下的两个信任函数, m_1 和 m_2 为相应的基本概率分配函数,其焦元分别为 A_i ($i=1,2, \dots, N$),则对于命题 $A \in U$,两个证据的 D-S 融合法则^[17]:

$$m(A)=[m_1 \oplus m_2](A)=\frac{1}{1-K} \sum_{A_i \in A} m_1(A_i)m_2(A_i) \quad (4)$$

式中: $K = \sum_{A_i \in \emptyset} m_1(A_i)m_2(A_i)$ 为分配给空集的概率,反映了 m_1 与 m_2 之间的冲突程度。

在管道失效概率评估中,辨识框架 U 表示可能的底事件组成的集合,信任度函数 bel 表示专家对该底事件可能发生概率的评估结果。

要融合事件 A_i 在属性集 I 下的信息,以求取事件集中各事件 A_i 的概率,就必须知道各个属性(证据)在不同事件下的 mass 函数。理论上,如果某一属性信息与属性集的平均信息越匹配,则说明该属性越有利于融合,不确定度越低,应赋予较高的 mass 函数值^[15]。为此,设计记分矩阵 $\mathbf{G}=(g_{ij})_{m \times n}$,设计属性体系平均信息 $\bar{g}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_{ij}$, $i=1,2, \dots, m$ 。

属性 I_j 的 q 阶不确定度^[18]:

$$\text{DOI}(I_j)=\frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m (r_{ij})^q \right]^{q^{-1}} \quad (5)$$

其中: $r_{ij} = \frac{\min_{i=1}^m |g_{ij} - \bar{g}_i| + \zeta \max_{i=1}^m |g_{ij} - \bar{g}_i|}{|g_{ij} - \bar{g}_i| + \zeta \max_{i=1}^m |g_{ij} - \bar{g}_i|}$ ($i=1,2, \dots, m$;

$j=1,2, \dots, n$) 为灰色均值关联度。常系数 ζ 为灰色关联的分辨系数,用于调整比较环境的程度,实际应用中一般取 $\zeta=0.5$ 。同时,为便于比较,取 $q=2$ 。

为保证记分函数不出现负值,对记分函数矩阵进行规范化处理^[15]:

$$\bar{g}_{ij} = \frac{g_{ij} - \min_i(g_{ij})}{\max_i(g_{ij}) - \min_i(g_{ij})} \quad (6)$$

令长度为 t ($t \neq 0$) 的有限差异信息序列 $x=(x_1, x_2, \dots, x_t)$,且至少存在 $x_j \neq 0$, $j \in J$, $J=\{1,2, \dots, t\}$ 为序列的指标集,称映射^[19] $f: x \rightarrow y$, $y_j = \frac{x_j}{\sum_{k=1}^t x_k}$ ($j \in J$) 为有限序列 x 的信息结构算子,这里 $y=(y_1, y_2, \dots, y_t)$ 称为信息结构映像序列。

由式(6)和信息结构算子计算,可以得到属性 I_j 下底事件 A_i 的 mass 函数:

$$m_j(i)=[1-\text{DOI}(I_j)]y_{ij} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{Y}=(y_{ij})_{m \times n}$ 是规范化的记分函数矩阵在信息结构算子作用下所得到的信息结构映像序列矩阵。

由于对管道失效底事件认识的不确定性,上述属性 I_j 在各底事件下 mass 函数之和可能小于 1,即辨识框架存在整体不确定性。为此,赋予辨识框架 U 整体不确定性的 mass 函数^[15]为:

$$m_j(i+1)=1-\sum_{i=1}^m m_j(i) \quad (j=1,2, \dots, n) \quad (8)$$

综上所述,可以得到不同底事件 A_i 在各属性 I_j 下的 mass 函数,然后利用 D-S 证据融合法则对所得的 mass 函数进行证据融合,从而可以得到各个底事件发生的概率。

2.3 失效概率评估步骤

基于区间直觉模糊数的管道失效概率评估步骤如下:①构建 D-S 证据理论下的辨识框架 U ,其依赖于经验的总结,是所有认识到的可能底事件的互斥集合;②构建区间直觉模糊矩阵 $\mathbf{D}=(d_{ij})_{m \times n}$,邀请多位专家(现场工作人员)对故障树底事件发生的概率进行区间直觉模糊数评判;③由区间直觉模糊矩阵 \mathbf{D} 和式(1)计算区间记分函数矩阵 $\mathbf{S}=(s_{ij})_{m \times n}$,并假定 s_{ij} 服从正态分布;④在给定风险偏好因子的情况下,由式(2)、式(3)计算记分矩阵 \mathbf{G} ;⑤由式(5)~式(8)计算确定各属性下底事件的 mass 函数和辨识框架整体不确定性;⑥根据式(4)D-S 融合法则进行属性信息融合,从而得到给定风险偏好下事件集中各事件发生概率,同时根据信度函数最大化原则实现各事件结构重要度排序;⑦在未给定风险偏好的情况下,可以通过调整风险偏好因子的取值,探寻底事件发生概率及结构重要度排序的变化趋势,从而得到主要的影响因素。

3 应用实例

以管道焊接失效故障树为例,参照故障树确定原则,选择管道焊接失效作为顶端事件,考虑管材、设计、施工等多方面因素,得到管道失效的9种主要影响因素(图1、表1)^[9]。

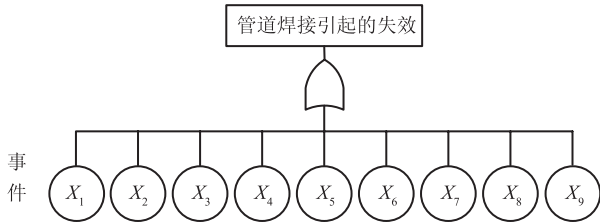


图1 管道焊接失效故障树

表1 管道焊接失效故障树的基本事件

符号	意义	符号	意义
X_1	焊缝表面有气	X_6	有未焊透部分
X_2	存在显微裂缝	X_7	焊接方法不当
X_3	存在渗碳现象	X_8	表面预处理质量差
X_4	存在过热组织	X_9	焊接材料不合格
X_5	焊后清理不仔细	—	缺省值

令辨识框架 $U = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9\}$, 取 $2^U = \{\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_1, X_2, \dots, X_9\}\}$ 。邀请两位专家及一位现场工作人员采用区间直觉模糊数的方式对某地区管道焊接失效各底事件发生概率进行评估并汇总结果(表2)。

表2 区间直觉模糊评判矩阵

符号	专家1	专家2	现场人员
X_1	$([0, 0.2], [0.5, 0.7])$	$([0, 0.1], [0.4, 0.7])$	$([0.1, 0.2], [0.5, 0.6])$
X_2	$([0.1, 0.2], [0.6, 0.7])$	$([0.2, 0.3], [0.5, 0.6])$	$([0.1, 0.2], [0.4, 0.6])$
X_3	$([0.6, 0.8], [0.1, 0.2])$	$([0.4, 0.7], [0.1, 0.2])$	$([0.5, 0.6], [0.2, 0.3])$
X_4	$([0.3, 0.6], [0.1, 0.3])$	$([0.5, 0.8], [0, 0.1])$	$([0.7, 0.8], [0, 0.1])$
X_5	$([0.2, 0.5], [0.3, 0.4])$	$([0.3, 0.4], [0.2, 0.5])$	$([0.4, 0.5], [0.3, 0.4])$
X_6	$([0.1, 0.2], [0.5, 0.7])$	$([0, 0.3], [0.3, 0.5])$	$([0.1, 0.2], [0.4, 0.5])$
X_7	$([0.1, 0.2], [0.6, 0.7])$	$([0, 0.3], [0.4, 0.5])$	$([0, 0.1], [0.6, 0.8])$
X_8	$([0.2, 0.3], [0.4, 0.6])$	$([0, 0.1], [0.6, 0.8])$	$([0.1, 0.2], [0.5, 0.6])$
X_9	$([0.1, 0.2], [0.5, 0.7])$	$([0.1, 0.3], [0.4, 0.6])$	$([0, 0.2], [0.5, 0.6])$

上述评估模式的意义在于,以专家1对底事件 X_1 (焊缝表面有气)的评估为例,专家1认为该地区 X_1 发生的可能性为 $0 \sim 0.2$,不可能发生的概率为 $0.5 \sim 0.7$,则犹豫的程度区间为 $0.1 \sim 0.5$,从而避免了传统评估过程中专家模糊语言去模糊化及精确的数值估计难以全面表述专家评估结果的局限。

根据专家及现场人员给定的管道焊接失效底事件区间直觉模糊评判矩阵(假定专家及现场人员给定的评判权重相同),由式(1)可得区间记分函数矩阵 S :

$$S = \begin{bmatrix} [-0.7, -0.3] & [-0.7, -0.3] & [-0.5, -0.3] \\ [-0.6, -0.4] & [-0.4, -0.2] & [-0.5, -0.2] \\ [0.4, 0.7] & [0.2, 0.6] & [0.2, 0.4] \\ [0, 0.5] & [0.4, 0.8] & [0.6, 0.8] \\ [-0.2, 0.2] & [-0.2, 0.2] & [0, 0.2] \\ [-0.6, -0.3] & [-0.5, 0] & [-0.4, -0.2] \\ [-0.6, -0.4] & [-0.5, -0.1] & [-0.8, -0.5] \\ [-0.4, -0.1] & [-0.8, -0.5] & [-0.5, -0.3] \\ [-0.6, -0.3] & [-0.5, -0.1] & [-0.6, -0.3] \end{bmatrix}$$

假定区间记分函数服从正态分布,根据区间记分函数矩阵 S 及式(2)、式(3)得记分矩阵 G ,在此取风险偏好因子 $\alpha = 0$ (即风险中立型):

$$G = \begin{bmatrix} -0.4998 & -0.4998 & -0.3999 \\ -0.4999 & -0.2999 & -0.3498 \\ 0.5502 & 0.4002 & 0.3001 \\ 0.2503 & 0.6002 & 0.7001 \\ 0.0002 & 0.0002 & 0.1001 \\ -0.4498 & -0.2497 & -0.2999 \\ -0.4999 & -0.2998 & -0.6498 \\ -0.2498 & -0.6498 & -0.3999 \\ -0.4498 & -0.2998 & -0.4498 \end{bmatrix}$$

根据记分函数矩阵 G 及式(5)得到指标 I_j 的不确定度 $DOI(I_j)$:

$$DOI(I_j) = [0.2405 \quad 0.2453 \quad 0.2498]$$

由式(6)和信息结构算子计算得到信息结构映像序列矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0.0330 & 0.0568 \\ 0 & 0.0769 & 0.0682 \\ 0.3962 & 0.2308 & 0.2159 \\ 0.2830 & 0.2747 & 0.3068 \\ 0.1887 & 0.1429 & 0.1705 \\ 0.0189 & 0.0879 & 0.0795 \\ 0 & 0.0769 & 0 \\ 0.0943 & 0 & 0.0568 \\ 0.0189 & 0.0769 & 0.0455 \end{bmatrix}$$

根据式(7)、式(8)构建 mass 函数 $m_j(i)$ 和辨识框架整体不确信度 $m_j(i+1)$:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.0249 & 0.0426 \\ 0 & 0.0580 & 0.0512 \\ 0.3009 & 0.1741 & 0.1620 \\ 0.2149 & 0.2073 & 0.2302 \\ 0.1433 & 0.1078 & 0.1279 \\ 0.0143 & 0.0664 & 0.0597 \\ 0 & 0.0581 & 0 \\ 0.0716 & 0 & 0.0426 \\ 0.0143 & 0.0581 & 0.0341 \\ 0.2405 & 0.2453 & 0.2498 \end{bmatrix}$$

其中:底事件集整体的不确定性 mass 函数值分别为 $m_1(10)=0.2405, m_2(10)=0.2453, m_3(10)=0.2498,$

平均值为 0.2452,即辨识框架整体不确信度为 24.52%。

根据式(4)D-S 证据融合法则,得到辨识框架内各子集的信度函数,即管道失效底事件的失效概率(简记为 d_i^α ,其中 $i=\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, [X_1, X_2, \dots, X_9]\}$)为:

$$d_i^\alpha = \{0.0153, 0.0273, 0.3237, 0.3423, 0.1463, 0.0378, 0.0148, 0.0297, 0.0284, 0.0345\}$$

其中:焊接失效底事件集整体不确信度为 3.45%,相比融合前的 24.52%,显著降低了主观认识的不确定性。

底事件失效结构重要度排序结果: $X_4 > X_3 > X_5 > X_6 > X_8 > X_9 > X_2 > X_1 > X_7$ 。当风险偏好不同(即选取不同的风险偏好因子)时,各底事件的失效概率有所不同,其排序亦可能产生一些变化(表 3)。

表 3 风险偏好因子的灵敏度分析

风险偏好程度	偏好因子 α	d_i^α	结构重要度排序
完全规避风险	-1	0.0138, 0.0403, 0.3284, 0.3271, 0.1412, 0.0388, 0.0212, 0.0328, 0.0300, 0.0264	$X_3 > X_4 > X_5 > X_2 > X_6 > X_8 > X_9 > X_7 > X_1$
一般风险规避	-0.5	0.0144, 0.0296, 0.3290, 0.3452, 0.1448, 0.0375, 0.0162, 0.0290, 0.0282, 0.0260	$X_4 > X_3 > X_5 > X_6 > X_2 > X_8 > X_9 > X_7 > X_1$
风险中立	0	0.0153, 0.0273, 0.3237, 0.3423, 0.1463, 0.0378, 0.0148, 0.0297, 0.0284, 0.0345	$X_4 > X_3 > X_5 > X_6 > X_8 > X_9 > X_2 > X_1 > X_7$
一般风险偏好	0.5	0.0164, 0.0250, 0.3248, 0.3512, 0.1467, 0.0378, 0.0144, 0.0285, 0.0285, 0.0266	$X_4 > X_3 > X_5 > X_6 > X_8 > X_9 > X_2 > X_1 > X_7$
完全接受风险	1	0.0229, 0.0228, 0.3056, 0.3534, 0.1482, 0.0431, 0.0160, 0.0272, 0.0332, 0.0275	$X_4 > X_3 > X_5 > X_6 > X_9 > X_8 > X_1 > X_2 > X_7$

根据管道焊接底事件的失效概率及结构重要度排序(表 3),随着信息使用者风险偏好程度的不同,底事件失效概率及结构重要度排序有所变化,但事件 X_3 、事件 X_4 、事件 X_5 对管道失效的影响始终都排在前列,为该地区管道焊接失效较为重要的影响因素,事件 X_1 、事件 X_7 对该地区管道焊接失效影响较小,评价结果与该地区统计情况相符。

4 结论

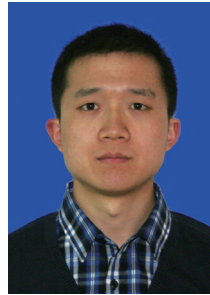
将区间直觉模糊数和风险偏好因子引入故障树分析模式下管道定量风险评估中的失效概率评估,较好地解决了以下问题:专家主观模糊评价过程中隶属度函数选择无统一适用准则;表示方法不能全面涵盖专家对底事件发生的支持、反对、中立的程度;融合各专家评判信息时没有考虑信息使用者的风险偏好。在考虑评判信息使用者风险偏好的基础上,定义了一种基

于正态分布的区间数点算子,利用 D-S 证据理论和灰色关联分析实现了各专家评判信息的融合,进一步通过选取不同的风险偏好因子,探讨了底事件发生概率和结构重要度排序的灵敏度。该方法在完善故障树模糊分析方法的同时,能够有效地降低底事件集的不确定性。实例表明,该方法可全面地表述专家的主观评判,各专家评判信息融合结果与地区统计数据相符。

参考文献:

[1] 李鹤林. 油气管道失效控制技术[J]. 油气储运, 2011, 30(6): 401-409.
 [2] 翁永基. 油气管道泄漏事故的定量风险评估[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 108-112.
 [3] FREIRE J L F, VIEIRA R D, BENJAMIN A C. Experimental techniques in the field of pipeline integrity[J]. Experimental Techniques, 2006, 30(4): 4-50.

- [4] 崔铭伟, 曹学文. 腐蚀缺陷对中高强度油气管道失效压力的影响[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1086-1092.
- [5] 黄小美, 李百战, 彭世尼, 等. 燃气管道失效概率评估方法研究[J]. 石油学报, 2010, 1(4): 664-667.
- [6] 陈杨, 王为民, 陈伟聪, 等. 基于故障树与模糊理论的埋地管道风险评估[J]. 油气储运, 2011, 30(7): 481-485.
- [7] 董玉华, 高惠临, 周敬恩, 等. 长输管线失效状况模糊故障树分析方法[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 85-89.
- [8] 郑贤斌, 陈国明. 基于 FTA 油气长输管道失效的模糊综合评判方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 1(2): 139-144.
- [9] 胡镁林, 黄坤, 吴晓南. 基于 D-S 证据理论的天然气管道可靠性评价[J]. 油气储运, 2011, 30(7): 490-493.
- [10] 曹涛, 张华兵, 周利剑, 等. 基于模糊层次分析法的管道第三方破坏风险评价[J]. 油气储运, 2012, 31(2): 99-102.
- [11] 纪雯, 王建辉, 方晓柯, 等. 一种区间二型模糊隶属度函数的构造新方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 618-623.
- [12] ATANASSOV K T, GARGOV G. Interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 32(3): 343-349.
- [13] XU Z S. Some geomentric aggregation operations based on intuitionistic fuzzy sets[J]. Int J of General Systems, 2006, 35(4): 417-433.
- [14] 徐泽水. 区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 215-219.
- [15] 李鹏, 刘思峰. 基于灰色关联分析和 D-S 证据理论的区间直觉模糊决策方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(8): 993-998.
- [16] 汪新凡, 肖满生. 基于正态分布区间数的信息不完全的群决策方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1494-1497.
- [17] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. New York: Princeton University Press, 1976.
- [18] 王育红, 党耀国. 基于灰色关联系数和 D-S 证据理论的区间数投资决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(11): 128-134.
- [19] 张岐山. 灰朦集的差异信息理论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- (收稿日期: 2013-08-10; 修回日期: 2014-06-11; 编辑: 潘红丽)



基金项目: 国家科技支撑项目“基于风险的油气管道事故预防关键技术研究”, 2011BAK06B01; 国家自然科学基金重点项目“高强度管线钢土壤腐蚀的关键影响因素及机理研究”, 51131001。

作者简介: 王瀚翎, 在读硕士生, 1986年生, 2009年毕业于北京科技大学自动化专业, 现主要从事管道事故预防技术研究。

WANG Hanling, reading master, born in 1986, graduated from University of Science and Technology Beijing, automation, in 2009, engaged in the research of pipeline accident prevention technology.
Tel: 18010022178, Email: wanghanling1510@163.com

下 期 要 目

- 国内海洋储罐风险现状及开展 RBI 的必要性
.....王力, 等
- 全球油气管道建设概况
.....王红莉
- 中国石油海外管道完整性管理的必要性和挑战
.....李大全, 等
- 油气管道体积型腐蚀缺陷有限元分析
.....杨辉, 等
- 储油罐收油作业危险区域数值模拟
.....马健
- 日东管道杂散电流干扰检测与防护
.....任增珺
- 输油管道泄漏河流污染影响评价模型及应用
.....刘冰, 等
- 一体式焊接截止阀的带压堵漏
.....解应涛, 等
- 溢油扩散分析技术的研究与应用
.....李保吉, 等
- 共用调压系统对特殊用户计量的影响
.....吴华, 等