

# 基于三角模糊数学与事故树模型的油气输送管道风险分析

王馨玉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省天然气有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2024年2月29日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年4月28日

## 摘要

随着全球经济迅猛发展, 油气作为重要战略资源在国民经济中占有极其重要的地位, 而压力管道作为长距离输送油气的载体, 其输送可靠性是保证油气能源安全最重要的环节。截至2022年底我国长输油气管网总里程约18万公里, 因此确保油气输送安全平稳成为热门研究课题。本文主要聚焦压力管道的爆炸事故, 将事故树分析法和三角模糊数学法结合使用, 确定基本事件发生概率, 准确的找出导致压力管道爆炸事故发生的最基本的事件, 从而提出相应的预防措施。

## 关键词

压力管道, 事故树分析法, 三角模糊数学法

# Risk Analysis of Oil and Gas Transportation Pipeline Based on Triangular Fuzzy Mathematics and Fault Tree Model

Xinyu Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Technology, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Natural Gas Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

With the rapid development of the global economy, oil and gas play an extremely important role

as an important strategic resource in the national economy. As the carrier of long-distance oil and gas transportation, the reliability of pressure pipelines is the most important link to ensure oil and gas energy security. As of the end of 2022, the total length of China's long-distance oil and gas pipeline network is about 180000 kilometers, making ensuring safe and stable oil and gas transportation a hot research topic. This article mainly focuses on the explosion accidents of pressure pipelines, combining the fault tree analysis method and triangular fuzzy mathematics method to determine the probability of basic events, accurately identify the most basic events that cause pressure pipeline explosion accidents, and propose corresponding preventive measures.

## Keywords

Pressure Pipeline, Fault Tree Analysis Method, Triangular Fuzzy Mathematical Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来在油气的管道运输作业中频频发生爆炸事故，这对人民的生命安全造成巨大的威胁同时也给国家造成了难以弥补的经济损失，因此，在投产前对压力管道进行严谨的定量分析是达到安全设计标准，保证压力管道安全、正常地投入生产的必要途径。

针对压力管道的特点、性能以及使用材料的特性等因素对压力管道可能存在的风险进行系统的阐述，并对该项研究的使用方法——三角模糊数学法和事故树分析法进行详尽的介绍。其次以压力管道爆炸事故为顶上事件绘制事故树，对事故的发生进行定性分析得到导致顶上事件发生的三十个基本事件并求出最小割集和结构重要度。之后使用专家打分法确定每一个基本事件发生的三个概率，求其平均值、方差并采用上面建立的模型计算基本事件三角模糊概率，再用事故树与三角模糊数学相结合的方法求出顶上事件发生的概率。最后求出各个基本事件的模糊重要度并对每个基本事件的模糊重要度进行比较。分析可得：人为破坏、管道附近电线绝缘层老化、控制室线路电流过大、控制管道的阀门密封不良、管道法兰密封不良、操作不规范等基本事件最有可能导致压力管道爆炸事故。

本文通过介绍三角模糊数学法的原理、使用方法、原则、算法，以及事故树的模糊处理和模糊概率的确定，研究压力管道爆炸的引发原因及原理，将事故树分析法与三角模糊数学法结合起来对压力管道爆炸事故进行分析，先绘制事故树找出导致顶上事件发生的基本事件进行定性分析，而后利用三角模糊数学法对得到的基本事件进行定量分析求出模糊重要度从而准确的找到导致压力管道爆炸事故发生概率最大的基本事件并提出相应的整改措施[1] [2]。

## 2. 三角模糊数学与事故树综合模型

### 2.1. 三角模糊概率

#### 2.1.1. 确定基本事件的三角模糊概率

对于实际系统中某个顶上事件来说，基本事件的精确概率可以通过参考文献和经验记录的数据统计出来。有的基本事件由于受其故障概念的模糊性、自然气候、人为失误等因素的影响，无精确概率数据的基本事件则必须通过专家打分的方法获得，由三人以上专家组成小组进行评定工作，每个专家都根据

经验给出各基本事件发生概率的估计值,最后求出平均值  $m$  作为该基本事件的精确概率[3]。

有统计精确概率数据的基本事件的精确概率并不是固定不变的,它会在某个范围内上下波动。因此,将有统计的基本事件精确概率值进行模糊处理,并转化为三角模糊概率。某个基本事件的概率值为  $q$ ,应转换为三角模糊数  $q = (l, m, u)$  的形式。

当进行无精确概率统计数据的基本事件的模糊处理时,用  $3\sigma$  表征法求取模糊概率值。三个专家分别给出各基本事件发生概率的估计值,求取其平均值为  $m$ ,标准差为  $\sigma$ 。假设估计的概率值服从正态分布,则概率值分布在区间  $[m - 3\sigma, m + 3\sigma]$  的概率为 99.7%。使  $l = u = 3\sigma$ ,则  $3\sigma$  为波动值的上下限,并将各个概率值表征为  $(3\sigma, m, 3\sigma)$  的形式。

对于离散型的随机变量来说,均值  $m$  是其数学期望值  $E(x)$ ,计算公式为:

$$E(x) = m = \frac{1}{n}(a_1 + a_2 + \dots + a_n) \quad (1-1)$$

式中:  $m$ ——均值;

$E(x)$ ——数学期望值;

$n$ ——数据总数量;

$a_n$ ——第  $n$  个数值。

$$D(x) = \sigma^2 = \sum_{k=1}^n [x_k - E(x)]^2 P_k \quad (1-2)$$

式中:  $D(x)$ ——方差;

$\sigma$ ——标准差;

$n$ ——数据总数量;

$k$ ——当前数值序号;

$x_k$ ——第  $k$  个数;

$E(x)$ ——数学期望值;

$P_k$ ——第  $K$  项的概率值。

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\sum_{k=1}^n [x_k - E(x)]^2 P_k} \quad (1-3)$$

式中  $\sigma$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $x_k$ 、 $E(x)$ 、 $P_k$ 、 $D(x)$  含义均同公式(1-2)。

其中,  $x$  为第  $k$  项的概率值,根据离散概率论,表达式为:

$$P_k = \frac{1}{n} (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-4)$$

式中:  $P_k$ 、 $n$ 、 $k$  含义均同公式(1-2)。

### 2.1.2. 顶上事件的模糊概率分布

计算顶上事件的模糊概率分布之前,要先求出事故树的最小割集,并运用模糊“与门”和模糊“或门”的运算公式,对顶上事件的模糊概率进行计算。

假设,事故树的结构函数为  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ,  $x_i$  为基本事件。由此可以逐层求出顶上事件的三角模糊概率,表达式为  $\tilde{q}_T = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = (l, m, u)$ ,模糊概率分布在  $(m - l, m + u)$  的范围内时与实际相符。

## 2.2. 事故树的模糊处理

事故树主要由逻辑“与门”和“或门”进行连接的,表示了上下层事件的逻辑关系。根据传统事故

树分析方法，将模糊事故树中的模糊“与门”和模糊“或门”进行准确定义[4]。

传统事故树中的逻辑“与门”的算子公式为：

$$q_{AND} = \prod_{i=1}^n q_i \quad (1-5)$$

式中： $q_{AND}$ ——与门中顶上事件发生概率；

$q_i$ ——第  $i$  个基本事件发生的精确概率 ( $i=1,2,3,\dots,n$ )；

$n$ ——系统中共有  $n$  个基本事件；

$i$ ——第  $i$  个基本事件。

传统事故树中的逻辑“或门”的算子公式为：

$$q_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (1-6)$$

式中： $q_{OR}$ ——或门中顶上事件发生概率；

$q_i$ 、 $n$ 、 $i$  含义均同公式(1-1)。

模糊“与门”的算子公式为：

$$\tilde{q}_{AND} = \tilde{q}_1 \otimes \tilde{q}_2 \otimes \dots \otimes \tilde{q}_n = (l_{AND}, m_{AND}, u_{AND}) = \left( \prod_{i=1}^n l_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n u_i \right) \quad (1-7)$$

式中： $\tilde{q}_{AND}$ ——与门中顶上事件发生的模糊概率；

$\tilde{q}_n$ ——第  $n$  个基本事件发生的模糊概率 ( $n=1,2,3,\dots,n$ )；

$l_{AND}$ ——与门中顶上事件发生模糊概率中的盲度；

$u_{AND}$ ——与门中顶上事件发生模糊概率中的盲度；

$m_{AND}$ ——与门中顶上事件发生模糊概率中的均值；

$n$ ——基本事件的个数；

$i$ ——第  $i$  个基本事件；

$l_i$ ——第  $i$  个基本事件发生模糊概率中的盲度；

$m_i$ ——第  $i$  个基本事件发生模糊概率中的均值；

$u_i$ ——第  $i$  个基本事件发生模糊概率中的盲度。

模糊“或门”的算子公式为：

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{OR} = (l_{OR}, m_{OR}, u_{OR}) &= 1 - \left( 1 - \prod_{i=1}^n \tilde{q}_i \right) \\ &= \left( 1 - \left( 1 - \prod_{i=1}^n l_i \right), 1 - \left( 1 - \prod_{i=1}^n m_i \right), 1 - \left( 1 - \prod_{i=1}^n u_i \right) \right) \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中： $\tilde{q}_{OR}$ ——或门中顶上事件发生的模糊概率；

$l_{OR}$ ——或门中顶上事件发生模糊概率中的盲度；

$u_{OR}$ ——或门中顶上事件发生模糊概率中的盲度；

$m_{OR}$ ——或门中顶上事件发生模糊概率中的均值。

$n$ 、 $i$ 、 $l_i$ 、 $m_i$ 、 $u_i$  的含义均同公式(1-3)。

### 2.3. 确定基本事件的模糊概率

对于实际系统中某个顶上事件来说，基本事件的精确概率可以通过参考文献和经验记录的数据统计

出来。有的基本事件由于受其故障概念的模糊性、自然气候、人为失误等因素的影响，无精确概率数据的基本事件则必须通过专家打分的方法获得，由三人以上专家组成小组进行评定工作，每个专家都根据经验给出各基本事件发生概率的估计值，最后求出平均值  $m$  作为该基本事件的精确概率[4]。

有统计精确概率数据的基本事件的精确概率并不是固定不变的，它会在某个范围内上下波动。因此，将有统计的基本事件精确概率值进行模糊处理，并转化为三角模糊概率。某个基本事件的概率值为  $q$ ，应转换为三角模糊数  $q = (l, m, u)$  的形式。

在进行无精确概率统计数据的基本事件的模糊处理时，用  $3\sigma$  表征法求取模糊概率值。三个专家分别给出各基本事件发生概率的估计值，求取其平均值为  $m$ ，标准差为  $\sigma$ 。假设估计的概率值服从正态分布，则概率值分布在区间  $[m - 3\sigma, m + 3\sigma]$  的概率为 99.7%。使  $l = u = 3\sigma$ ，则  $3\sigma$  为波动值的上下限，并将各个概率值表征为  $(3\sigma, m, 3\sigma)$  的形式。对于离散型的随机变量来说，均值  $m$  是其数学期望值  $E(x)$ 。

## 2.4. 顶上事件的模糊概率分布

计算顶上事件的模糊概率分布之前，要先求出事故树的最小割集，并运用模糊“与门”和模糊“或门”的运算公式，对顶上事件的模糊概率进行计算。

假设，事故树的结构函数为  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ， $x_i$  为基本事件。由此可以逐层求出顶上事件的三角模糊概率，表达式为  $\tilde{q}_T = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = (l, m, u)$ ，模糊概率分布在  $(m - l, m + u)$  的范围内时与实际相符。

## 2.5. 基本事件的模糊度分析

在传统事故树分析中，基本事件对顶上事件发生的影响程度用基本事件的概率重要度进行描述。在模糊事故树分析中，由于表征概率可能性分布范围的模糊数不是精确的概率值，首先运用中值法求出模糊数的中位数，其次求出基本事件的模糊重要度，用其表示对顶上事件的影响程度。

对于三角模糊数来说，令：

$$A_1 = \int_{m-l}^m \mu_A(x) dx \quad (1-9)$$

$$A_2 = \int_m^{m+u} \mu_A(x) dx \quad (1-10)$$

$$A = A_1 + A_2 \quad (1-11)$$

求取中位数的具体方法如下：

1) 当  $u < l$

$$\int_{m-l}^z \frac{x-m+l}{l} dx = \int_z^m \frac{x-m+l}{l} dx + \int_m^u \frac{m+u-x}{u} dx$$

$$\text{得 } T'_z = m - \sqrt{l^2 - ul} \quad (1-12)$$

式中： $T'$ ——基本事件的中位数；

$z$ ——该三角模糊数的中位数；

$x$ ——所求三角模糊数。

2) 当  $u > l$

$$\int_{m-l}^z \frac{x-m+l}{l} dx + \int_z^m \frac{m+u-x}{u} dx = \int_m^u \frac{m+u-x}{u} dx$$

$$\text{得 } T'_z = m + \sqrt{u^2 - ul} \quad (1-13)$$

式中： $T'_z$ 、 $z$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $u$ 、 $x$  的含义均同公式(1-12)。

对于结构函数  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的事故树来说，基本事件  $x_i$  的模糊重要度可由如下公式判断：

$$S_i = T_z - T'_{iz} \tag{1-14}$$

式中： $S_i$ ——模糊重要度；

$T_z$ ——顶上事件的中位数；

$T'_{iz}$ ——第  $i$  个基本事件的中位数。

当  $S_i > S_j$ ，则  $x_i$  对系统的影响比  $x_j$  的小，因此提高系统的可靠性应优先选择  $x_j$ 。由于每个基本事件的模糊重要度代表着该事件对顶上事件影响的重要程度，因此可以根据求得的重要度来对目标事件提供防范措施及参考意见。

### 3. 建立三角模糊事故树

在压力管道爆炸事故分析中的应用根据事故树分析的不足和模糊数学理论的优点，在事故树分析的基础上引入模糊数学的理论，形成模糊事故树分析方法。由于三角模糊数的意义明确且容易理解，因此运用三角模糊事故树分析方法进行分析和描述。对高压管道爆炸事故及对系统的影响的案例研究的特点分析。压力管道爆炸事故树如图 1 所示，事故树基本事件及其概率如表 1 所示。

#### 3.1. 计算最小割集

压力管道事故树定性分析的主要目的是分析出导致压力管道事故发生的所有可能事件。压力管道事故树的所有可能事件即为最小割集，都分别代表系统的一种事故模式[5]。本文采用的求最小割集的方法是布尔代数法。

根据压力管道事故树写出布尔代数的表达式：

$$\begin{aligned}
 T &= M_1 \cdot M_2 \cdot X_1 \\
 T &= (M_3 + M_4) \cdot (M_5 + M_6) \cdot X_1 \\
 &= (X_2 + X_3 + X_4 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{22} \cdot X_{23} + X_{22} \cdot X_{24} + X_{22} \cdot X_{25} \\
 &\quad + X_{26} \cdot X_{27} + X_{11} + X_{12} + X_{13} \cdot X_{28} + X_{13} \cdot X_{29} + X_{13} \cdot X_{30}) \\
 &\quad \cdot (X_5 + X_6 + X_7 + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21}) \cdot X_1
 \end{aligned}$$

根据最小割集理论和布尔代数法得出压力管道的爆炸事故的所有最小割集为：

$\{X_1, X_{10}, X_{14}\}$ ,  $\{X_1, X_{10}, X_{15}\}$ ,  $\{X_1, X_{10}, X_{16}\}$ ,  $\{X_1, X_{10}, X_{17}\}$ ,  $\{X_1, X_{10}, X_{18}\}$ ,  $\{X_1, X_{10}, X_{19}\}$ ,  
 $\{X_1, X_{10}, X_{20}\}$ ,  $\{X_1, X_{10}, X_{21}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{14}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{15}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{16}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{17}\}$ ,  
 $\{X_1, X_{11}, X_{18}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{19}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{20}\}$ ,  $\{X_1, X_{11}, X_{21}\}$ ,  $\{X_1, X_{12}, X_{14}\}$ ,  $\{X_1, X_{12}, X_{15}\}$  等 165 个。

可以看出，基本事件中任何一个基本事件的发生都可能导致压力管道爆炸事故的发生，同时基本事件组合的发生也可能导致压力管道爆炸事故的发生。

之后通过基本事件发生的结构重要度的计算中可以得到：

$$\begin{aligned}
 I(X_1) &> I(X_{12}) = I(X_{11}) = I(X_{10}) = I(X_9) = I(X_8) = I(X_4) = I(X_3) = I(X_2) > I(X_{22}) \\
 &= I(X_{13}) > I(X_{27}) = I(X_{26}) > I(X_{21}) = I(X_{20}) = I(X_{19}) = I(X_{18}) = I(X_{17}) = I(X_{16}) = I(X_{15}) \\
 &= I(X_{14}) = I(x_7) = I(x_6) = I(x_5) > I(x_{30}) = I(x_{29}) = I(x_{28}) = I(x_{25}) = I(x_{24}) = I(x_{23})
 \end{aligned}$$

由此可以得到爆炸极限和由于管理疏忽造成的人员操作失误和未及时检测到设备的电路老化、损坏等原因是造成压力管道爆炸的主要原因。



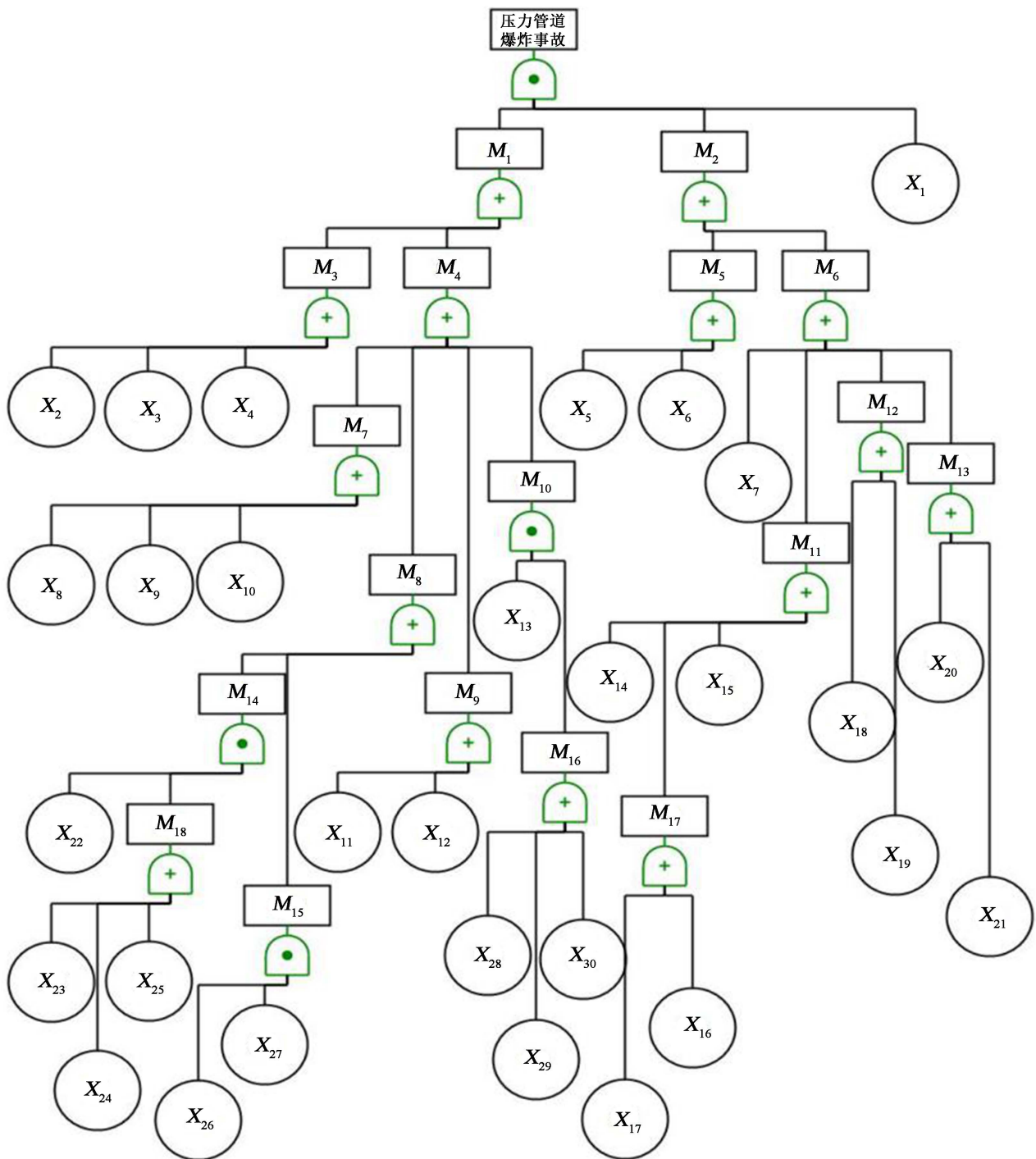


Figure 1. Accident tree of pressure pipeline explosion accident  
图 1. 压力管道爆炸事故的事故树

### 3.2. 基本事件概率的专家模糊打分

三位专家分别对 30 个基本事件发生概率进行评估，之后用专家打分和  $3\sigma$  法对结果进行评估，并将  $\tilde{q} = (l, m, u)$  的形式转换为  $\tilde{q} = (3\sigma, m, 3\sigma)$  的形式[6]。每个基本事件的三位专家打分概率如表 2 所示。

**Table 1.** Basic event probability of fault tree  
**表 1.** 事故树基本事件概率

事件编号	事件名称	基本事件概率
$X_1$	爆炸极限	0.12
$X_2$	吸烟	0.20
$X_3$	违规用火	0.15
$X_4$	未备灭火器等设备	0.14
$X_5$	工作人员未及时通风	0.11
$X_6$	通风设备损坏	0.12
$X_7$	操作不规范	0.25
$X_8$	控制室线路绝缘层老化	0.17
$X_9$	控制室短路	0.10
$X_{10}$	控制室线路电流过大	0.08
$X_{11}$	器械碰撞	0.12
$X_{12}$	人穿带铁钉的鞋	0.17
$X_{13}$	雷击	0.20
$X_{14}$	管道内壁老化	0.18
$X_{15}$	人为破坏	0.15
$X_{16}$	控制管道的阀门密闭不良	0.11
$X_{17}$	管道的法兰密闭不良	0.10
$X_{18}$	焊接失误	0.20
$X_{19}$	连接处老化	0.18
$X_{20}$	管道老化	0.18
$X_{21}$	防腐不到位	0.21
$X_{22}$	接地不良	0.15
$X_{23}$	流速过快	0.18
$X_{24}$	管壁过于粗糙	0.15
$X_{25}$	使用化纤产品	0.16
$X_{26}$	与导体接触	0.12
$X_{27}$	没有穿绝缘工作服	0.18
$X_{28}$	现场无避雷设备或失效	0.16
$X_{29}$	设计不合理	0.28
$X_{30}$	工作人员疏忽未及时安装或维修	0.18

**Table 2.** Expert scoring results for basic events without precise probability statistics  
**表 2.** 无精确概率统计的基本事件的专家打分结果

基本事件	专家打分概率		
$X_1$ 爆炸极限	0.018	0.016	0.026
$X_2$ 吸烟	0.042	0.054	0.051
$X_3$ 违规用火	0.027	0.036	0.028



续表

$X_4$ 未备灭火器等设备	0.048	0.046	0.050
$X_5$ 工作人员未及时通风	0.010	0.017	0.022
$X_6$ 通风设备损坏	0.052	0.049	0.052
$X_7$ 操作不规范	0.051	0.045	0.059
$X_8$ 管道防腐层老化	0.062	0.056	0.055
$X_9$ 控制室短路	0.006	0.005	0.007
$X_{10}$ 控制室线路电流过大	0.063	0.050	0.059
$X_{11}$ 器械碰撞	0.046	0.043	0.059
$X_{12}$ 人穿带铁钉的鞋	0.034	0.047	0.022
$X_{13}$ 雷击	0.006	0.003	0.002
$X_{14}$ 管道内壁老化	0.042	0.024	0.034
$X_{15}$ 人为破坏	0.065	0.054	0.056
$X_{16}$ 控制管道的阀门密闭不良	0.056	0.046	0.059
$X_{17}$ 管道的法兰密闭不良	0.060	0.046	0.057
$X_{18}$ 焊接失误	0.032	0.028	0.028
$X_{19}$ 连接处老化	0.037	0.049	0.024
$X_{20}$ 管道老化	0.039	0.032	0.035
$X_{21}$ 防腐不到位	0.032	0.038	0.026
$X_{22}$ 接地不良	0.024	0.022	0.018
$X_{23}$ 流速过快	0.035	0.042	0.040
$X_{24}$ 管壁过于粗糙	0.027	0.022	0.032
$X_{25}$ 使用化纤产品	0.017	0.020	0.023
$X_{26}$ 与导体接触	0.037	0.032	0.029
$X_{27}$ 没有穿绝缘工作服	0.035	0.038	0.027
$X_{28}$ 现场无比类设备或失效	0.023	0.017	0.026
$X_{29}$ 设计不合理	0.025	0.032	0.028
$X_{30}$ 工作人员疏忽未及时安装或维修	0.036	0.042	0.032

对于  $X_1$  来说,  $m = \frac{1}{3}(0.018 + 0.016 + 0.026) = 0.020$

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{1}{3}[(0.018 - 0.020)^2 + (0.016 - 0.020)^2 + (0.026 - 0.020)^2]} = 0.0043$$

$$3\sigma = 0.013$$

对于  $X_2$  来说,  $m = \frac{1}{3}(0.042 + 0.054 + 0.051) = 0.049$

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{1}{3}[(0.042 - 0.049)^2 + (0.054 - 0.049)^2 + (0.051 - 0.049)^2]} = 0.0051 \quad 3\sigma = 0.015$$

对于  $X_3$  来说,  $m = \frac{1}{3}(0.027 + 0.036 + 0.028) = 0.030$

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{1}{3}[(0.027 - 0.030)^2 + (0.036 - 0.030)^2 + (0.028 - 0.030)^2]} = 0.004$$

$$3\sigma = 0.012$$

对于  $X_4$  来说,  $m = 0.048$ ,  $3\sigma = 0.005$ ; 对于  $X_5$  来说,  $m = 0.016$ ,  $3\sigma = 0.015$

对于  $X_6$  来说,  $m = 0.051$ ,  $3\sigma = 0.004$ ; 对于  $X_7$  来说,  $m = 0.052$ ,  $3\sigma = 0.017$

对于  $X_8$  来说,  $m = 0.058$ ,  $3\sigma = 0.009$ ; 对于  $X_9$  来说,  $m = 0.006$ ,  $3\sigma = 0.002$

对于  $X_{10}$  来说,  $m = 0.057$ ,  $3\sigma = 0.016$ ; 对于  $X_{11}$  来说,  $m = 0.049$ ,  $3\sigma = 0.021$

对于  $X_{12}$  来说,  $m = 0.034$ ,  $3\sigma = 0.031$ ; 对于  $X_{13}$  来说,  $m = 0.004$ ,  $3\sigma = 0.005$

对于  $X_{14}$  来说,  $m = 0.033$ ,  $3\sigma = 0.022$ ; 对于  $X_{15}$  来说,  $m = 0.058$ ,  $3\sigma = 0.014$

对于  $X_{16}$  来说,  $m = 0.054$ ,  $3\sigma = 0.017$ ; 对于  $X_{17}$  来说,  $m = 0.054$ ,  $3\sigma = 0.006$

对于  $X_{18}$  来说,  $m = 0.029$ ,  $3\sigma = 0.003$ ; 对于  $X_{19}$  来说,  $m = 0.037$ ,  $3\sigma = 0.030$

对于  $X_{20}$  来说,  $m = 0.035$ ,  $3\sigma = 0.009$ ; 对于  $X_{21}$  来说,  $m = 0.032$ ,  $3\sigma = 0.005$

对于  $X_{22}$  来说,  $m = 0.021$ ,  $3\sigma = 0.009$ ; 对于  $X_{23}$  来说,  $m = 0.0393$ ,  $\sigma = 0.009$

对于  $X_{24}$  来说,  $m = 0.027$ ,  $3\sigma = 0.012$ ; 对于  $X_{25}$  来说,  $m = 0.0203$ ,  $\sigma = 0.007$

对于  $X_{26}$  来说,  $m = 0.033$ ,  $3\sigma = 0.010$ ; 对于  $X_{27}$  来说,  $m = 0.0333$ ,  $\sigma = 0.014$

对于  $X_{28}$  来说,  $m = 0.022$ ,  $3\sigma = 0.011$ ; 对于  $X_{29}$  来说,  $m = 0.0283$ ,  $\sigma = 0.010$

对于  $X_{30}$  来说,  $m = 0.037$ ,  $3\sigma = 0.012$

最后转换为  $q = (m - 3\sigma, m, m + 3\sigma)$  的三角模糊数学的形式进行表示得到以下结果:

$$q_1 = (0.007, 0.020, 0.033); q_2 = (0.034, 0.049, 0.064); q_3 = (0.018, 0.030, 0.042)$$

$$q_4 = (0.043, 0.048, 0.053); q_5 = (0.001, 0.016, 0.031); q_6 = (0.047, 0.051, 0.055)$$

$$q_7 = (0.035, 0.052, 0.069); q_8 = (0.049, 0.058, 0.067); q_9 = (0.004, 0.006, 0.008)$$

$$q_{10} = (0.041, 0.057, 0.073); q_{11} = (0.028, 0.049, 0.070); q_{12} = (0.003, 0.034, 0.065)$$

$$q_{13} = (0.001, 0.040, 0.009); q_{14} = (0.011, 0.022, 0.055); q_{15} = (0.044, 0.058, 0.072)$$

$$q_{16} = (0.037, 0.054, 0.071); q_{17} = (0.048, 0.054, 0.060); q_{18} = (0.026, 0.029, 0.032)$$

$$q_{19} = (0.007, 0.037, 0.067); q_{20} = (0.026, 0.035, 0.041); q_{21} = (0.027, 0.032, 0.037)$$

$$q_{22} = (0.012, 0.021, 0.030); q_{23} = (0.030, 0.039, 0.048); q_{24} = (0.015, 0.027, 0.039)$$

$$q_{25} = (0.013, 0.020, 0.027); q_{26} = (0.023, 0.033, 0.043); q_{27} = (0.017, 0.033, 0.047)$$

$$q_{28} = (0.011, 0.022, 0.033); q_{29} = (0.018, 0.028, 0.038); q_{30} = (0.025, 0.037, 0.049)$$

因为  $u = l = 3\sigma$ , 因此  $T'_z = m$ ;

根据事故树和专家打分综合可得顶上事件发生概率为：(0.0003,0.002,0.006)

$$T_Z = m' = 0.002$$

$$S_1 = T_Z - T'_{1Z} = 0.018; S_2 = T_Z - T'_{2Z} = 0.047; S_3 = T_Z - T'_{3Z} = 0.028$$

$$S_4 = T_Z - T'_{4Z} = 0.046; S_5 = T_Z - T'_{5Z} = 0.014; S_6 = T_Z - T'_{6Z} = 0.049$$

$$S_7 = T_Z - T'_{7Z} = 0.050; S_8 = T_Z - T'_{8Z} = 0.056; S_9 = T_Z - T'_{9Z} = 0.004$$

$$S_{10} = T_Z - T'_{10Z} = 0.055; S_{11} = T_Z - T'_{11Z} = 0.047; S_{12} = T_Z - T'_{12Z} = 0.032$$

$$S_{13} = T_Z - T'_{13Z} = 0.038; S_{14} = T_Z - T'_{14Z} = 0.020; S_{15} = T_Z - T'_{15Z} = 0.056$$

$$S_{16} = T_Z - T'_{16Z} = 0.052; S_{17} = T_Z - T'_{17Z} = 0.052; S_{18} = T_Z - T'_{18Z} = 0.027$$

$$S_{19} = T_Z - T'_{19Z} = 0.035; S_{20} = T_Z - T'_{20Z} = 0.033; S_{21} = T_Z - T'_{21Z} = 0.030$$

$$S_{22} = T_Z - T'_{22Z} = 0.019; S_{23} = T_Z - T'_{23Z} = 0.037; S_{24} = T_Z - T'_{24Z} = 0.025$$

$$S_{25} = T_Z - T'_{25Z} = 0.018; S_{26} = T_Z - T'_{26Z} = 0.031; S_{27} = T_Z - T'_{27Z} = 0.031$$

$$S_{28} = T_Z - T'_{28Z} = 0.020; S_{29} = T_Z - T'_{29Z} = 0.026; S_{30} = T_Z - T'_{30Z} = 0.035$$

因此可得：

$$S_{15} = S_8 > S_{10} > S_{16} = S_{17} > S_7 > S_6 > S_2 > S_{11} > S_4 > S_{13} > S_{23} > S_{19} = S_{30} > S_{20} > S_{12} > S_{26} \\ = S_{27} > S_{21} > S_3 > S_{18} > S_{29} > S_{24} > S_{28} = S_{14} > S_{22} > S_1 = S_{25} > S_5 > S_9$$

### 3. 结论

通过将三角模糊数学与事故树相结合的方法分析导致油气输送管道爆炸事故发生的原因，以三角模糊数学对专家打分数据进行处理，弥补事故树定性有余而定量不足的缺点，油气储运行业鲜少使用两种方法复合模型对发生事故进行分析，该模型不仅可以清晰得到各类危险有害因素还可以在无法提供设备设施故障率的情况下实现定量分析，从而为企业防止类似事故发生提供有针对性的预防措施建议。目前可用于化工、油气行业的数字模型越来越普及，但是油气行业企业不注重收集统计设备失效率、设备实际使用寿命、零备件完好率等数据，给安全风险分析带来一定的困难，得到的结论偏重于主观判断。下一步建议行业主管部门应该愈发规范油气企业设备完好性管理，以数据为底建立风险分析、预警模型，可为企业及时发现并处理故障提供准确的理论依据，有效减少事故发生概率，营造良好的安全生产氛围。

### 参考文献

- [1] 崔效敬. 现代安全管理[M]. 北京: 中国文联出版社, 2005.
- [2] Rauzy, A. (1993) New algorithms for Fault Tree Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, **40**, 203-211. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90060-C](https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90060-C)
- [3] 肖位枢. 模糊数学基础及其应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [4] 贾智伟, 景国勋, 张强. 基于三角模糊数的火灾事故树分析[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 62-65.
- [5] 张俊福, 邓本让, 朱玉仙, 等. 应用模糊数学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [6] 候福均, 肖贵平. 模糊事故树分析及其研究[J]. 河北师范大学学报, 2001, 25(4): 464-468.