

文章编号: 2095-2163(2020)09-0053-03

中图分类号: TP311

文献标志码: A

# 基于故障树的钻井井塌事故分析方法研究

徐英卓, 张倩

(西安石油大学 计算机学院, 西安 710065)

**摘要:** 本文运用故障树分析法, 建立钻井井塌事故的事故树模型, 通过计算最小割集、最小径集、结构重要度进行定性分析。通过对井塌事故定性分析可知, 有 192 条路径会导致钻井井塌事故的发生, 有 12 种方案可预防钻井井塌事故的发生。找出了对顶上事件发生影响最大的事件, 为钻井井塌风险的预防以及安全管理工作提供了可靠的依据。

**关键词:** 井塌; 故障树; 最小割集; 故障树分析法

## Research on analysis method of drilling well collapse accident based on fault tree

XU Yingzhuo, ZHANG Qian

(School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065)

**[Abstract]** Using the fault tree analysis method, an accident tree model of drilling well collapse accident is established, and the qualitative analysis is carried out by calculating the minimum cut set, minimum diameter set, and structural importance. Through qualitative analysis of well collapse accidents, it can be known that there are 192 paths leading to drilling well collapse accidents, and there are 12 schemes to prevent drilling well collapse accidents. The events that have the greatest impact on the top-of-line events is identified, and a reliable basis for the prevention of drilling well collapse and safety management is provided.

**[Key words]** well collapse; fault tree; accident identification; FTA

### 0 引言

井塌是钻井工程中常见的一类事故, 如果不及及时处理, 极易引发其它事故。例如遇阻、卡钻等, 还会影响固井质量。有针对性的对井塌事故进行分析, 采取有效的措施, 就能减少井塌事故带来的危害<sup>[1]</sup>。

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)是美国贝尔实验室提出的一种安全评价方法, 这个方法除了能分析出事故的直接原因, 还能揭示出事故的潜在原因, 是目前广泛使用的一种事故分析方法。本文用故障树分析法对井塌事故进行定性分析, 通过建立事故树, 分析井塌的原因, 计算最小割集, 求基本事件结构重要度, 得出造成井塌的主要原因, 以达到减少井塌事故发生的目的<sup>[2]</sup>。

### 1 井塌事故树模型的构建

故障树分析法可以定性分析导致井塌的原因, 以便采取有效措施, 从而有效的预防井塌事故的发生, 保障钻井工作的安全。建立事故树的方法具体如下:

(1) 定顶上事件。顶上事件是所要分析的事故, 本文为“钻井井塌”。

(2) 分析造成的井塌的原因。导致“井塌”发生的直接原因是“地质条件”、“钻井周期长”、“井底压

力激动过大”、“钻井液问题”、“井内液柱压力下降”、“井深质量差”、“和“井深结构问题”。这七个事件必须同时发生, 则顶事件就会发生, 因此用“与门”连接。

导致“地质条件”发生的直接原因事件是“泥页岩水化”、“含裂缝”、“含断层”、“含破裂带”, 这 4 个事件有一个发生, 则“地质条件”事件就会发生, 因此用“或门”连接。

依次分析对井塌事故的成因, 找出造成井塌事故发生的各中间事件和基本事件。各事件编号及意义见表 1。

(3) 绘制事故树。根据井塌事故树的成因分析, 构建基于故障树分析法的井塌事故树模型, 如图 1 所示。

### 2 井塌主要因素分析

故障树分析法是安全工程中重要的分析方法之一, 可以对事故进行定性、定量分析<sup>[3]</sup>。由于没有大量的钻井井塌事故统计数据, 无法进行定量分析。本文从井塌事故发生的路径(最小割集)、井塌事故的预防对策(最小径集)、结构重要度等 3 个方面对井塌事故定性分析。

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-383)。

**作者简介:** 徐英卓(1964-), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向: 智能信息处理、决策支持系统; 张倩(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能信息处理与可视化。

收稿日期: 2020-07-21

表1 井塌事故树的符号及意义

Tab. 1 Symbols and significance of the collapse tree

符号	意义	符号	意义
T <sub>0</sub>	钻井井塌	X <sub>8</sub>	起下钻速度快
M <sub>1</sub>	地质条件	X <sub>9</sub>	开泵过猛
M <sub>2</sub>	钻井周期长	X <sub>10</sub>	钻井液切力大
M <sub>3</sub>	井底压力激动过大	X <sub>11</sub>	流变性差
M <sub>4</sub>	钻井液问题	X <sub>12</sub>	抑制性差
M <sub>5</sub>	井内液柱压力下降	X <sub>13</sub>	钻井液失水量大
M <sub>6</sub>	井深质量差	X <sub>14</sub>	钻井液入侵地层
M <sub>7</sub>	井深结构问题	X <sub>15</sub>	井漏
M <sub>8</sub>	钻井液性能差	X <sub>16</sub>	灌浆不及时
X <sub>1</sub>	泥页岩水化	X <sub>17</sub>	井喷
X <sub>2</sub>	含裂缝	X <sub>18</sub>	井斜不规则
X <sub>3</sub>	含断层	X <sub>19</sub>	严重狗腿
X <sub>4</sub>	含破裂带	X <sub>20</sub>	井斜
X <sub>5</sub>	钻速慢	X <sub>21</sub>	井深结构不合理
X <sub>6</sub>	组织停工多	X <sub>22</sub>	技术套管下深不够
X <sub>7</sub>	钻头泥包		

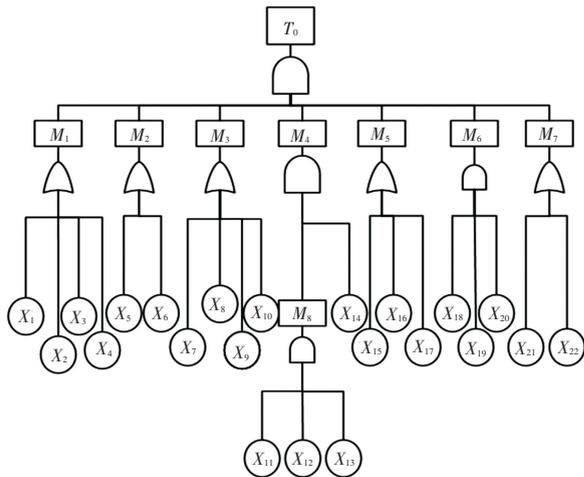


图1 井塌事故树

Fig. 1 he collapse tree

2.1 基于最小割集的井塌发生途径分析

导致顶上事件发生的基本事件被称为割集,导致顶上事件发生必须的割集称为最小割集。最小割集的求取方法有行列式法、布尔代数法等<sup>[4]</sup>。本文运用布尔代数法计算。根据图1知,井塌事故树的结构函数表达式(1)为:

$$T = M_1 M_2 M_3 M_4 M_5 M_6 M_7. \quad (1)$$

利用布尔代数法求事故树的最小割集,式(2):

$$T = (M_1 M_2 M_3 M_4 M_5 M_6 M_7 = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)(X_5 + X_6)(X_7 + X_8 + X_9 + X_{10})M_8 X_{14}(X_{15} + X_{16} + X_{17})X_{18}X_{19}X_{20}(X_{21} + X_{22}) = ((X_1 + X_2 + X_3 + X_4)(X_5 + X_6)(X_7 + X_8 + X_9 + X_{10})X_{11}X_{12}X_{13}X_{14}(X_{15} + X_{16} + X_{17})X_{18}X_{19}X_{20}(X_{21} + X_{22})). \quad (2)$$

化简展开,共求得 192 组最小割集,分别为式(3):

$$K_1 = \{X_1, X_5, X_7, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{21}\},$$

$$K_2 = \{X_1, X_5, X_7, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{22}\},$$

.....

$$K_{191} = \{X_4, X_6, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{21}\},$$

$$K_{192} = \{X_4, X_6, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{22}\}. \quad (3)$$

每一个割集就是造成井塌事故发生的一条路径。由此可以看出钻井井塌事故发生途径很多,预防井塌事故发生尤为重要。基本事件有 22 个,属于不安全状态和行为的 13 种,分别为泥页岩水化、含裂缝、含断层、含破裂带、流变性差、抑制性差、钻井液失水量大、钻井液入侵地层、井漏、井喷、井斜不规则、严重狗腿、井斜,剩下的 9 种为技术管理因素,所以不安全状态及行为对井塌事故的影响很大。如果针对其发生路径进行防控,则费时费力,可以利用故障树分析法的最小径集,找出最优方案。

2.2 基于最小径集的井塌预防方法分析

最小径集是顶上事件发生的最低限度的基本事件集合。利用最小割集和最小径集的对偶性,做出成功树,就是把原来的与门变成或门,或门变成与门。求出其最小割集,就是原来故障树的最小径集。

根据图1知,井塌事故树的结构函数表达式为式(4):

$$T' = M_1' + M_2' + M_3' + M_4' + M_5' + M_6' + M_7' = (X_1' X_2' X_3' X_4') + X_5' X_6' + X_7' X_8' X_9' X_{10}' + M_8' + X_{14}' + X_{15}' X_{16}' X_{17}' + X_{18}' + X_{19}' + X_{20}' + X_{21}' X_{22}'. \quad (4)$$

因此,钻井井塌事故的最小径集有式(5):

$$P_1 = \{X_1' X_2' X_3' X_4'\},$$

$$P_2 = \{X_5' X_6'\},$$

⋮

$$P_{12} = \{X_{21}' X_{22}'\}.$$

每一个最小径集就是一个预防方案,因此有 12 个方案可以防止井塌事故的发生。

2.3 井塌事故树基本事件结构重要度分析

结构重要度分析是指当各基本事件发生概率相同的情况下,分析各个基本事件对顶上事件发生的影响程度。求得最小割集后,可以根据式(6)1 求结构重要度系数:

$$I_i = 1 - \prod (1 - \frac{1}{2^{N_{ij}-1}}). \quad (6)$$