

长螺旋钻机成桩混合料堵管的模糊故障树分析

海 涛, 赵晓东*

(济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250013)

摘要:在钻探工程施工过程中,不可避免地会出现机械故障。采用故障树分析其原因是常用的方法之一。但工程施工中,往往数据不足或不注意保存这些数据,实际应用时难以赋值,只能进行定性分析。针对工程施工机械出现故障的模糊性和不确定性,用模糊数描述底事件的发生概率,提出一种基于三角模糊数的工程施工机械故障树分析方法。该方法通过专家、现场技术人员及操作人员的经验构造三角模糊数描述各底事件发生的概率区间,通过计算三角模糊数的中位数重要度,按重要度大小对故障原因排序,作为制定预防措施的依据。最后将其应用于长螺旋钻机成桩混合料堵管的原因分析,按模糊重要度对故障有针对性地制定预防措施。结果表明:重要影响因素排序与现场技术人员及操作人员的定性分析与判断相符。

关键词:长螺旋钻机;混合料堵管;模糊故障树;三角模糊数;中位数

中图分类号:TU753.3;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)03-0142-08

The fuzzy fault tree analysis of mix-material blocking pipe in pile-forming of long spiral drill

HAI Tao, ZHAO Xiaodong*

(Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250013, China)

Abstract: In the process of drilling engineering construction, the mechanical failure will inevitably appear. The fault tree is one of the common methods to analyze the causes. But in the construction, due to the insufficient data or no attention to save these data, assigning value is difficult in the actual application and only qualitative analysis can be made. In view of the fuzziness and uncertainty when faults of the engineering construction machinery happened, the occurrence probability of the bottom event is described with fuzzy number, and a machinery fault tree analysis method for engineering construction based on triangular fuzzy number is proposed. This method uses the experience of experts, field technicians and operators to describe the probability interval of each bottom event. The median importance of the triangular fuzzy number is calculated and is used to sort the causes of the fault, which is served as the basis for formulating preventive measures. Finally, it is applied to the reason analysis of mix-material blocking pipe of long spiral drill, and makes targeted preventive measures for faults according to the fuzzy importance. The results show that the ranking of important influencing factors is consistent with the qualitative analysis and judgment of the field technicians and operators.

Key words: long spiral drill; mix-material blocking pipe; fuzzy fault tree; triangle fuzzy number; median

0 引言

故障树分析是在产品设计或生产过程中,通过对可能造成失效的各种原因定性分析,绘制出逻辑

因果图(故障树),描绘出分系统或元件失效以及人为失误事件引起系统失效的逻辑关系,从而确定产品失效原因的各种可能组合方式或其发生概率的一

收稿日期:2023-10-22;修回日期:2023-12-17 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.03.019

第一作者:海涛,男,汉族,1988年生,高级工程师,土木工程专业,主要从事轨道交通施工安全管理、泉水保护方面的研究工作,山东省济南市历下区智远街道舜华北路济南轨道交通姜家庄停车场办公楼3楼,haitao20110911@126.com。

通信作者:赵晓东,男,汉族,1983年生,高级工程师,采矿工程专业,主要从事轨道交通施工安全管理、工程监测与测量方面的研究工作,山东省济南市历下区智远街道舜华北路济南轨道交通姜家庄停车场办公楼3楼,sdxiaodong2010@126.com。

引用格式:海涛,赵晓东.长螺旋钻机成桩混合料堵管的模糊故障树分析[J].钻探工程,2024,51(3):142-149.

HAI Tao, ZHAO Xiaodong. The fuzzy fault tree analysis of mix-material blocking pipe in pile-forming of long spiral drill[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):142-149.

种分析方法^[1]。故障树分析后可根据产品的失效概率,采取相应的预防措施,以提高产品的可靠性^[2]。

故障树分析最初是由美国贝尔电话公司的H. A. Watson和A. B. Mearas于1962年为研究民兵式导弹发射控制系统而提出的。随后由波音公司的Heasl、Schroder、Jackson等人的努力,对事故树分析法做了重大的改进并迅速发展起来,后来转入原子能工业及其它工业生产领域的应用。我国从1978年开始研究普及推广故障树方法,现已与多种学科和理论结合,广泛应用于可靠性分析,在很多领域取得显著成效^[2-3]。

故障树分析的早期应用主要集中在故障树建模、故障树定性分析和故障树定量评估3个方面。随着系统复杂性增加,其研究逐步发展为多态故障分析。近年来,结合模糊理论、贝叶斯网络、马尔可夫、蒙特卡洛模拟和专家系统等方法,针对不同情况构建出各具特色的故障树模型和分析计算方法,获得了更加广泛的研究和应用^[4]。

与故障树分析相关的另一种方法是可靠性设计。可靠度是可靠性设计中常用的一个重要概念,即机械零部件在规定工作条件下,在预定的使用寿命内,无故障地完成规定功能的概率,即分析对象不发生故障的概率^[2]。可靠性设计在钻探设备中已有应用^[5-6]。但作为可靠性分析的主要方法,故障树分析在钻探设备中的应用尚不多见。

对于钻探设备,尤其是新引进的设备,由于应用时间短和其它条件限制,难以确定设备元件故障数据的准确值,也无法获得足够的实验和现场数据,因而用传统意义上的故障树方法进行定量分析是困难的。即使进行了这种分析,也常常与实际有较大的出入。但是,在工程机械使用过程中,行业专家、工程技术人员及操作人员却都积累了一些经验和值得吸取的教训,而这些经验和教训往往又是模糊的和定性的。为了将这些实际积累的经验运用到故障树分析中,Hideo等^[7]与Tanaka等^[8]先后将模糊概率理论应用到故障树分析中,将底事件视为模糊变量,这样既减小了获取基本事件发生概率精确值的难度,又充分利用现有的统计数据并允许存在描述误差,具有较大的灵活性和适应性,克服了传统故障树分析的不足。之后,模糊数学方法在机械故障树分析中得到了较为广泛的应用^[9-13]。在这类模糊方法中,尤以具有代表性的三角模糊数能反

映机械使用的客观实际而备受关注^[14-17]。但由于三角模糊数的大小比较方法有多种^[18-20],实际应用中往往会出现排序结果不一致的情况。在这些应用中,以三角模糊数的中值进行重要度计算排序的方法最为常用^[21-22],但在工程施工中的应用却较为少见。安慧等^[23]将其用于建筑施工高处坠落全面风险评估,取得较好的效果。本文则根据专家咨询、现场技术人员及操作人员的经验构造三角模糊数描述各底事件发生的概率区间,将其应用于长螺旋钻机成桩混合料堵管的可能性分析及其主要因素分析,根据影响因素排序,制定相应的预防措施。

1 模糊故障树分析的步骤^[21-22,24]

1.1 三角模糊数

论域 R 上的一个模糊集 \tilde{A} 称为三角模糊数,若它满足:

(1)存在 R 上的3个点 m_L, m, m_U ,且 $m_L < m < m_U$;

(2)隶属函数具有如下形式:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x - m_L}{m - m_L}, & m_L \leq x < m \\ \frac{m_U - x}{m_U - m}, & m \leq x \leq m_U \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

记两个三角模糊数分别为:

$$\tilde{m}_1 = [L_1(x), m_1, R_1(x)] = (m_L^1, m_1, m_U^1),$$

$$\tilde{m}_2 = [L_2(x), m_2, R_2(x)] = (m_L^2, m_2, m_U^2),$$

$$(0 < m_1 < m_2),$$

其中, $\mu_{\tilde{m}_1}(m_1) = \mu_{\tilde{m}_2}(m_2) = 1$, $L_1(x) = a_1x - b_1$, $R_1(x) = -c_1x + d_1$, $L_2(x) = a_2x - b_2$, $R_2(x) = -c_2 + d_2$, $(a_i, b_i, c_i, d_i > 0, m_i, x \in [m_L^i, m_U^i], i = 1, 2)$ 。 $L_i(x), R_i(x)$ 在支集 $\text{supp} \tilde{m}_i (i = 1, 2)$ 内为严格单调且连续,因此三角模糊数是有界闭模糊数。

三角模糊数图示如图1。

记 $l = m - m_L, u = m_U - m$ (图2),则三角模糊数又可表示为 $\tilde{A} = (l, m, u)$,其 λ 截集为^[25]:

$$A_\lambda = [(m - l) + \lambda l, (m + u) - \lambda u] \quad (2)$$

1.2 模糊数的代数运算

三角模糊数的代数运算是故障树分析及底事件重要度建模的基础,设有三角模糊数 \tilde{m}_1 与 \tilde{m}_2 ,其

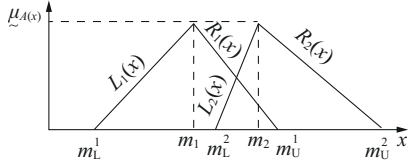
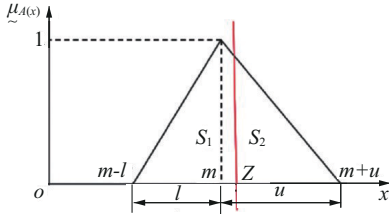
图1 三角模糊数 \tilde{m}_1 和 \tilde{m}_2 Fig.1 Triangle fuzzy number \tilde{m}_1 and \tilde{m}_2 

图2 三角模糊数函数曲线

Fig.2 The function curve for triangle fuzzy number

代数运算法则为^[26]:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_1 + \tilde{m}_2 &= (a_1, m_1, b_1) + (a_2, m_2, b_2) \\ &= (a_1 + a_2, m_1 + m_2, b_1 + b_2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$1 - \tilde{m}_1 = 1 - (a_1, m_1, b_1) \quad (4)$$

$$\tilde{m}_1 \otimes \tilde{m}_2 = (a_1, m_1, b_1) \otimes (a_2, m_2, b_2) \quad (5)$$

1.3 模糊故障树分析计算

用定义在 $[0, 1]$ 上某范围内的可能性分布代替概率的唯一数值,问题转化成在给出基本事件失效概率可能性分布的前提下计算作为一个模糊集的顶事件的失效概率的可能性分布。

故障树经规范化后,可成为仅含有底事件、结果事件及“与”、“或”、“非”3种逻辑门的故障树。假定 P_{x_i} 是 x_i 的失效概率,根据多元扩张原理,“与”、“或”门的模糊失效概率分别为:

$$P_{\tilde{Y}}^{\text{AND}} = \prod_{i=1}^n P_{\tilde{x}_i} = \left\{ \prod_{i=1}^n m_{L_i}^i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n m_{U_i}^i \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{\tilde{Y}}^{\text{AND}} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\tilde{x}_i}) = \\ &= \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_{L_i}^i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_{U_i}^i) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $x_i = (m_{L_i}, m_i, m_{U_i}) (i = 1, 2, \dots, n)$ ——底事件失效概率的可能性分布,为三角模糊数。

依据故障树结构,可求出顶事件故障可能性分布。

1.4 模糊重要度分析

在用模糊故障树分析时,假定基本事件故障数据的可能性函数为正有界闭模糊数。正模糊数 $\tilde{m}(x)$ 为有界闭模糊数的充要条件是:

$$\tilde{m}(x) = \begin{cases} L(x), & x < m \\ 1, & x = m \\ R(x), & x > m \end{cases} \quad (8)$$

式中: $L(x)$ ——增函数,右连续, $0 \leq L(x) < 1$ 且 $\lim_{x \rightarrow -\infty} L(x) = 0$; $R(x)$ ——减函数,左连续, $0 \leq R(x) < 1$ 且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} R(x) = 0$ 。

最早由 Tanaka 等^[8]提出的模糊重要度是直接利用顶事件与底事件三角模糊数的3个点计算,即:

$$\tilde{m} = (m_L - m_{L_i}) + (m_T - m_{T_i}) + (m_U - m_{U_i}) \quad (9)$$

但用这种重要度进行大小比较时往往会遇到与实际矛盾的情况。于是在文献[9]的基础上,文献[21-22]提出了模糊中位数法重要度分析方法。

如图2所示,令:

$$S_1 = \int_{m-l}^m L(x) dx,$$

$$S_2 = \int_m^{m+u} R(x) dx,$$

$$S = S_1 + S_2$$

若存在点 m_e 使得经该点为垂直分界线,模糊数曲线下的左、右两部分积分面积相等,则称 m_e 为该模糊数 $\tilde{m}(x)$ 的中位数。

但文献[21-22]并未直接给出中位数的求法。文献[26]从图2的三角形相似关系,推导出中位数的计算公式为:

$$m_e = \begin{cases} m + \sqrt{u^2 - ul}, & u \geq l \\ m - \sqrt{l^2 - ul}, & u < l \end{cases} \quad (10)$$

设故障树的结构函数为 $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i 故障数据的可能性分布为有界闭模糊数 \tilde{x}_i , 则顶事件故障数据的可能性分布为

$$\tilde{T} = \Phi(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) = [L_T(x), m_T, R_T(x)] \quad (11)$$

仍为有界闭模糊数,其中位数记为 m_T 。

$$\tilde{T}_i = \Phi_i(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{i-1}, 0, \tilde{x}_{i+1}, \dots, \tilde{x}_n)$$

$$= [L_{T_i}(x), m_{T_i}, R_{T_i}(x)] \quad (12)$$

其中位数记为 m_{T_i} 。称 $S_{T_i} = m_{T_i} - m_{T_n} > 0$ 为 x_i 的

模糊重要度。如果 $S_{T_i} \geq S_{T_j}$, 则认为 x_i 比 x_j 重要, 即部件 x_i 对系统的影响大于部件 x_j 对系统的影响。要降低系统的故障率, 那么应该先从部件 x_i 入手采取改进措施。

2 实例分析

长螺旋钻机由于其不提钻成桩, 避免了坍塌、漏失等复杂地层出现的疑难问题而得到较为广泛的应用。但在成桩过程中却常因堵管而影响其使用, 尤其是用于管内泵压 CFG 桩施工时这一问题更加突出。长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工是由长螺旋钻机、混凝土输送泵及强制式混凝土搅拌机组成的一套完整的施工系统(图 3)^[27]。混合料选用、配比、搅拌、管道输送、长螺旋钻杆输送、长螺旋钻具提升等都会影响其施工的可靠性, 需要多方面的配合才能保证正常施工。

此成桩工艺与压灌混凝土桩的主要不同点是, 用水泥、粉煤灰、砂子和石子的混合料代替混凝土, 施工过程中容易堵管, 影响施工进度及工程质量。

由于长螺旋钻管内泵压 CFG 桩应用时间短和其它条件限制, 难以确定设备元件故障数据的准确值, 因而用传统意义上的故障树分析与实际有较大出入。为此, 这里介绍用三角模糊数表示的故障树分析, 其任务是计算顶事件失效概率的可能性分布并分析影响系统可靠性的主要因素。

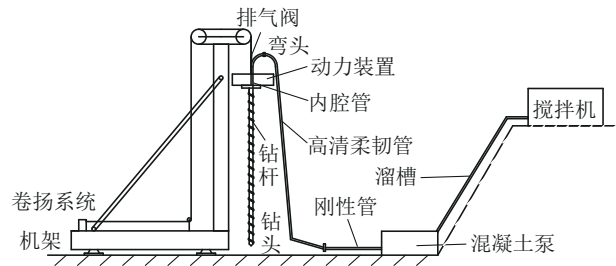


图 3 长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工系统

Fig.3 Flow chart of CFG pile construction system with inner pump pressure of long spiral drill pipe

2.1 确定顶事件

长螺旋钻机“混合料堵管”不仅影响正常的施工进度, 而且还往往导致断桩等质量事故的发生, 给工程施工造成较大的损失。因此, 将其确定为故障树的顶事件。

2.2 建造故障树

混合料堵管的首要原因是混合料不符合要求、设备缺陷、操作失误和环境变差。这 4 个中间事件任何一个发生且混合料在输送管内的局部、甚至大部分范围的摩阻力达到其在输送管内堵塞的条件时都会堵管。因此, 用或门与顶事件连接, 即形成树的第一级。再分别对这 4 个中间事件的发生原因继续进行跟踪分析, 其中在顶事件发生前有一个条件门, 最后形成如图 4 所示的故障树^[28]。图中符号的含义见表 1、表 2。

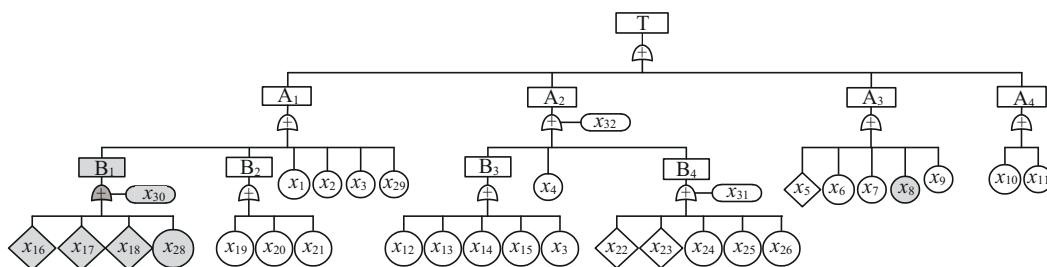


图 4 长螺旋钻管内泵压 CFG 桩成桩工艺混合料堵管故障树

Fig.4 Fault tree of mix-material blocking pipe in CFG pile technology with inner pump pressure of long spiral drill pipe

运用布尔代数法则化简得到 23 个交集的并集, 这 23 个交集就是 23 个最小割集, 每个最小割集都有 2 个基本事件。根据化简后的故障树结构式, 即可做出其等效图(不考虑图 4 中涂灰部分)。

2.3 模糊故障树分析

为了用模糊数表示事件失效概率, 这里采用成熟的语言变量与三角模糊数的对应关系(表 3)^[29],

通过发放调查表的形式对 2 位行业专家、2 位现场技术人员及 1 位操作人员咨询, 并对其赋予 0.25、0.25、0.2、0.2、0.1 的权重, 进行加权平均后, 再除以 100 即为底事件失效概率的三角模糊数。对咨询调查表整理后的结果参见表 1。

由式(2)对顶事件发生概率 P_T 作 λ 截集得:

$$T_T^\lambda = (0.1205 + 0.0318\lambda, 0.1665 - 0.0142\lambda)$$

表1 底事件的三角模糊数
Table 1 Triangle fuzzy number of bottom events

| 事件代号 | 事件名称 | <i>a</i> | <i>m</i> | <i>b</i> | <i>l</i> | <i>u</i> |
|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| x_1 | 塌落度大或小 | 0.0026 | 0.0046 | 0.0066 | 0.0020 | 0.0020 |
| x_2 | 未加泵送剂 | 0.009 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0010 | 0 |
| x_3 | 含气量大 | 0.0015 | 0.0033 | 0.0053 | 0.0018 | 0.0020 |
| x_4 | 输送泵性能差 | 0.0085 | 0.00975 | 0.0100 | 0.00125 | 0.00025 |
| x_5 | 未经培训 | 0.0019 | 0.0039 | 0.0059 | 0.0020 | 0.0020 |
| x_6 | 钻具提动不及时 | 0.0088 | 0.0099 | 0.0100 | 0.0011 | 0.0001 |
| x_7 | 钻头未提离孔底 | 0.0090 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0011 | 0.0001 |
| x_8 | 钻头提拔不协调 | 0.0090 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0011 | 0.0001 |
| x_9 | 输送管不清洁 | 0.0059 | 0.0079 | 0.00945 | 0.0020 | 0.00155 |
| x_{10} | 地层复杂 | 0.0026 | 0.0046 | 0.0066 | 0.0020 | 0.0020 |
| x_{11} | 气温影响 | 0.00095 | 0.0027 | 0.0047 | 0.00175 | 0.0020 |
| x_{12} | 弯头过小 | 0.0084 | 0.0097 | 0.0100 | 0.0013 | 0.0003 |
| x_{13} | 密封不良 | 0.0084 | 0.0097 | 0.0100 | 0.0013 | 0.0003 |
| x_{14} | 底阀不灵 | 0.0084 | 0.0097 | 0.0100 | 0.0013 | 0.0003 |
| x_{15} | 出料口小 | 0.0084 | 0.0097 | 0.0100 | 0.0013 | 0.0003 |
| x_{19} | 水泥量少 | 0.0057 | 0.0077 | 0.00925 | 0.002 | 0.00155 |
| x_{20} | 砂率小 | 0.0026 | 0.0046 | 0.0066 | 0.0020 | 0.0020 |
| x_{21} | 水灰比过大 | 0.0026 | 0.0046 | 0.0066 | 0.0020 | 0.0020 |
| x_{22} | 钻机离孔口过远 | 0.0026 | 0.0046 | 0.0066 | 0.0020 | 0.0020 |
| x_{23} | 送料滑槽过长 | 0.00095 | 0.0027 | 0.0047 | 0.00175 | 0.0020 |
| x_{24} | 软管接头过多 | 0.0048 | 0.0072 | 0.00865 | 0.0024 | 0.00145 |
| x_{25} | 使用普通搅拌机 | 0.0057 | 0.0077 | 0.00925 | 0.0020 | 0.00155 |
| x_{26} | 料未过筛 | 0.0049 | 0.0069 | 0.00865 | 0.0020 | 0.00175 |
| x_{27} | 混合料在管内阻力增大 | 0.0090 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0010 | 0 |

表2 故障树顶事件及中间事件

Table 2 The top and intermediate events of fault tree

| T | 混合料堵管 | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | A ₁ | A ₂ | A ₃ | A ₄ |
| A | 混合料不符合要求 | 设备缺陷 | 操作失误 | 环境影响 |
| B | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ |
| B | 原材料不符合要求 | 配合比不当 | 钻机 | 设备安装缺陷 |

以0.2为取值步长,不同置信区间下顶事件的 P_T 置信区间值见表4。

当 $\lambda=0$ 时, $P_T=(0.1205,0.1523,0.1665)$,即在考虑到故障的随机不确定性因素和模糊不确定性因素时长螺旋钻机施工时混合料堵管的概率在 $[0.1205,0.1665]$ 之间,而为0.1523的可能性最大。当 $\lambda=1.0$ 时,事件的发生概率为确定值 $P_T=0.1523$,即在不考虑基本事件发生概率的模糊性时,长螺旋钻机施工时混合料堵管的概率为0.1523。一般使用中,常取置信水平0.7。

要对长螺旋钻机施工时混合料堵管的原因按重要性进行排序,则还要计算各底事件的模糊重要度。

模块分割后,按式(6)、(7)、(10)由底事件失效

表3 语言变量与三角模糊数的对应关系

Table 3 The correspondence of linguistic variables with triangular fuzzy numbers

| 非常不影响 | 不影响 | 不太影响 | 一般 | 比较影响 | 影响 | 非常影响 |
|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,0,0.1 | 0,0.1,0.3 | 0.1,0.3,0.5 | 0.3,0.5,0.7 | 0.5,0.7,0.9 | 0.7,0.9,1.0 | 0.9,1.0,1.0 |

表4 不同λ取值的P_T置信区间

Table 4 The P_T confidence intervals for different λ values

| λ | l _T | m _T | u _T | λ | l _T | m _T | u _T |
|-----|----------------|----------------|----------------|-----|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 0.1205 | 0.1523 | 0.1665 | 0.6 | 0.1396 | 0.1523 | 0.1580 |
| 0.2 | 0.1268 | 0.1523 | 0.1636 | 0.8 | 0.1459 | 0.1523 | 0.1551 |
| 0.4 | 0.1322 | 0.1523 | 0.1608 | 1.0 | 0.1523 | 0.1523 | 0.1523 |

概率的可能性分布计算顶事件概率的可能性分布,即得顶事件的三角模糊数 $\tilde{m}(x)=(0.0277,0.1026,0.2330)$,与λ=0时的截集相同。

由式(11)~(13)用中值法计算的模糊重要度:

$S_{T11}, S_{T23}=0.1252, S_{T3}=0.1247, S_{T5}=0.1243,$
 $S_{T1}, S_{T10}, S_{T20}, S_{T21}, S_{T22}=0.1240, S_{T24}=0.1227, S_{T19},$
 $S_{T25}=0.1218, S_{T9}=0.1217, S_{T12}, S_{T13}, S_{T14}, S_{T15}=$
 $0.1201, S_{T4}=0.1200, S_{T6}, S_{T7}, S_{T8}=0.1196, S_{T2}=$

0.1195, $S_{T26}=0.1186$ 。

通过上述分析得知:

(1)该系统的失效概率以0.1026为最可能点,向左分布到0.0277,向右分布到0.2330;

(2)基本事件重要度排序为:

$x_{11}, x_{23} > x_3 > x_5 > x_1, x_{10}, x_{20}, x_{21}, x_{22}$
 $> x_{24} > x_{19}, x_{25} > x_9 > x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}$
 $> x_4 > x_6, x_7, x_8 > x_2 > x_{26}$ 。

这个重要度排序与现场实际是相符的。根据此结论,即可制定相应的混合料堵管预防措施。

为分析不同人员的语言变量值对最后分析结果的影响,除了采用不同的截集进行比较外,对行业专家、技术人员及操作工人分别采用0.20、0.20、0.20、0.20、0.20、0.20、0.25、0.25、0.10、0.25、0.25、0.15、0.15、0.20三种不同的权重计算,则得到的结果如表5。

表5 三种不同权重的敏感性分析

Table 5 Sensitivity analyses of three different weights

| 权 重 | 排 序 结 果 |
|--------------------------|---|
| 0.20,0.20,0.20,0.20,0.20 | $x_1, x_{23} > x_2 > x_3 > x_5 > x_1, x_{10}, x_{20}, x_{21}, x_{22} > x_{24} > x_{19}, x_{25} > x_9 > x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} > x_4 > x_6, x_7, x_8, x_{26}$ |
| 0.20,0.20,0.25,0.25,0.10 | $x_1, x_{23} > x_3 > x_2 > x_5 > x_1, x_{10}, x_{20}, x_{21}, x_{22} > x_{24} > x_{19}, x_{25} > x_9 > x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} > x_4 > x_6, x_7, x_8 > x_{26}$ |
| 0.25,0.25,0.15,0.15,0.20 | $x_1, x_{23} > x_2 > x_3 > x_5 > x_1, x_{10}, x_{20}, x_{21}, x_{22} > x_{24} > x_{19}, x_{25} > x_9 > x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} > x_4 > x_6, x_7, x_8 > x_{26}$ |

从表5看出:尽管对行业专家、技术人员及操作人员的调查结果权重进行了调整,但对基本事件重要度排序仅有较小的变化,影响不是很大。

如果改变不同咨询人员语言变量的赋值,即在分别固定专家调查意见、技术人员意见及操作人员意见的情况下,得到的排序结果如表6。

表6 三类不同调查人员敏感性分析

Table 6 Sensitivity analysis of three different investigators

| 权 重 | 排 序 结 果 |
|------|---|
| 行业专家 | $x_{11}, x_{24} > x_2, x_3, x_5 > x_1, x_{10}, x_{20}, x_{21}, x_{22} > x_{25} > x_9, x_{23} > x_4 > x_{26} > x_6, x_7, x_8, x_{26}, x_{13}, x_{14}, x_{15} > x_{19}$ |
| 技术人员 | $x_{23} > x_{20}, x_{21}, x_{22} > x_5, x_{24} > x_{19}, x_{25} > x_{26} > x_{11} > x_3 > x_1, x_2, x_4, x_{10} > x_9 > x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} > x_6, x_7, x_8$ |
| 操作人员 | $x_2 > x_1, x_3, x_5, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26} > x_4, x_6, x_7, x_8 > x_9$ |

从表6看出:改变调查人员对基本事件语言变量的赋值,对最终的排序结果影响较大,说明调查人员的意见对基本事件重要度排序结果是敏感的。

2.4 预防措施

选取前5类底事件作为预防成桩堵管的原因,制定如下预防措施^[30]:

2.4.1 控制气温影响,避免送料溜槽过长

(1)冬期施工时,直接用火加热储水箱,加热水来提高混合料的出口温度。但要控制好水温不能

过高,如超过60℃,搅拌混合料时,混合料早凝,也会产生堵管。

(2)尽可能缩短送料溜槽长度,条件许可时可不送料溜槽。

2.4.2 控制含气量

泵送棍合料时,如输送管内吸入了空气,应立即反泵吸出棍合料至料斗中重新搅拌,排出空气后再搅拌。

2.4.3 加强施工人员培训

(1) 选用技术素质较高的工人操作长螺旋钻机及强制式搅拌机。

(2) 开工前组织技术培训并进行技术交底。

2.4.4 按设计要求配制混合料,控制复杂地层混合料坍塌落度

(1) 严格按照配合比配制混合料,坍塌落度以180~220 mm为合格。

(2) 采用比试验室给出的砂率适当大的砂率,提高混合料和易性。

(3) 在场地允许的情况下,尽可能缩短输送管道长度。

2.4.5 控制软管接头过多

在条件许可时,应尽可能减少软管接头数量。

3 结论

(1) 在工程实践活动中,由于人们认识水平和条件的限制,不仅工程设备的失效状态具有模糊性,而且底事件及底事件对顶事件都存在模糊性,用传统的故障树分析无法得到按重要性排序的底事件,不能有针对性地制定纠正和预防措施。

(2) 在使用新设备初期,因操作等方面的经验不足,设备出现故障、人员操作失误方面缺乏数据,应用传统的故障树分析有一定困难。用模糊故障树分析解决了传统故障树分析中确定底事件发生概率的问题,得到的结果比传统故障树分析更符合实际。

(3) 行业专家、现场技术人员及操作人员的经验是宝贵的,将他们积累的经验通过简单的三角模糊数变换,采用中值法计算底事件的模糊度,克服了传统方法赋值比较的不足,应用于工程机械的故障分析是可行的。

参考文献(References):

- [1] 朱继洲.故障树原理和应用[M].西安:西安交通大学出版社,1989.
ZHU Jizhou. Fault Tree Principle and Application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989.
- [2] 谢鸣一,孙巨块,王泽甲.安全系统工程[M].北京:科学技术文献出版社,1988.
XIE Mingyi, SUN Jukuai, WANG Zejia. Safety System Engineering[M]. Beijing: Science and Technology Academic Press, 1988.
- [3] 郭济鸣,齐金平,李兴运.故障树分析法的现状与发展[J].装备机械,2018(2):61-66.

- GUO Jiming, QI Jinping, LI Xingyun. The status quo and development of fault tree analytical method[J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2018(2):61-66.
- [4] 李万宏.基于过程能力指数的设备运行动态可靠性评估与故障诊断[D].上海:上海海事大学,2023.
LI Wanhong. Equipment dynamic reliability assessment and fault diagnosis based on process capability indexes[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2023.
- [5] 陈逸.可靠性设计在钻探机械强度计算中的应用[J].探矿工程,1985(2):1-5.
CHEN Yi. Application of reliability design in the calculation of drilling mechanical strength[J]. Exploration Engineering, 1985(2):1-5.
- [6] 陈逸,王需贞.钻探机械齿轮强度的可靠性设计[J].探矿工程,1990(6):1-4.
CHEN Yi, WANG Xuzhen. Reliability design of gear strength of drilling machinery[J]. Exploration Engineering, 1990(6):1-4.
- [7] Hideo T, Fan L T, Lai F S, et al. Fault-tree analysis by fuzzy probability[J]. Transactions on Reliability, 1983,32(5):453-457.
- [8] Tanaka H, Fan L T, Lai F S, et al. Fault-tree analysis by fuzzy probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1984,32(5):453-457.
- [9] Mitauo Y. The median for a L-R fuzzy number[J]. Microelectronics Reliability, 1995,35(2):269-271.
- [10] 范宝庆,王国华,魏选平,等.基于T-S模糊故障树的某装备测控设备故障诊断研究[J].科学技术与工程,2012,12(28):7386-7390.
FAN Baoqing, WANG Guohua, WEI Xuanping, et al. Based on T-S Fuzzy fault tree a certain equipment measurement and control equipment fault diagnosis research[J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(28):7386-7390.
- [11] 黄洪钟.机械传动系统的模糊故障树分析[J].传动技术,1993(3):34-39.
HUANG Hongzhong. Fuzzy fault tree analysis of mechanical transmission system[J]. Drive System Technique, 1993(3):34-39.
- [12] 刘英,陈志恒,陈宇.基于模糊故障树的数控刀架系统可靠性分析[J].机械科学与技术,2016,35(1):80-84.
LIU Ying, CHEN Zhiheng, CHEN Yu. The reliability analysis of CNC turret system based on fuzzy fault tree[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016,35(1):80-84.
- [13] 陈农田,马婷,王杰,等.模糊故障树分析法在航空发动机滑油渗漏分析中的应用[J].计算机测量与控制,2016,24(6):64-67.
CHEN Nongtian, MA Ting, WANG Jie, et al. Aviation engine oil leakage fault analysis based on fuzzy fault tree theory[J]. Computer Measurement & Control, 2016,24(6):64-67.
- [14] 李琦,蒋宏业,刘洋,等.基于模糊故障树的螺杆钻具马达总成失效分析[J].石油矿场机械,2018,47(2):17-20.
LI Qi, JIANG Hongye, LIU Yang, et al. Failure analysis for the motor of PDM based on fuzzy fault tree[J]. Oil Field Equipment, 2018,47(2):17-20.
- [15] 王岳恒,马殷元.基于模糊故障树的垂直升降式立体车库升降系统可靠性分析[J].制造业自动化,2022,44(11):72-74,172.
WANG Yueheng, MA Yinyuan. Reliability analysis of vertical lifting stereo garage lifting system based on fuzzy fault tree[J]. Manufacturing Automation, 2022,44(11):72-74,172.

- [16] 陈红霞,王纪华,马爱博,等.基于模糊故障树的某重型数控机床主轴系统可靠性分析[J].机床与液压,2022,50(24):165-170.
CHEN Hongxia, WANG Jihua, MA Aibo, et al. Reliability analysis of spindle system of a heavy duty CNC machine tool based on fuzzy fault tree[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(24): 165-170.
- [17] 黄莉莉,兰淋,祁江涛,等.基于T-S模糊故障树的下滑信标故障诊断分析[J].科学技术与工程,2023,23(15):6661-6666.
HUANG Lili, LAN Lin, QI Jiangtao, et al. Fault diagnosis of glidepath beacon using T-S fuzzy fault tree[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15):6661-6666.
- [18] 张园园,张巨伟,赵爱彬,等.修正三角模糊事故树算法在化工生产事故预测中的应用[J].辽宁石油化工大学学报,2020,40(6):64-71.
ZHANG Yuanyuan, ZHANG Juwei, ZHAO Aibin, et al. Application of modified triangle fuzzy fault tree algorithm in accident prediction of chemical production[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2020, 40(6):64-71.
- [19] 孙振国,顾伯勤,黄星路.螺栓法兰连接模糊故障树分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2010,32(6):71-74.
SUN Zhenguo, GU Boqin, HUANG Xinglu. Fuzzy fault tree analysis of bolted flanged connections[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 32(6):71-74.
- [20] 郭彦申,郑胜国,段联国.小型动力电源零部件的模糊重要性评价研究[J].移动电源与车辆,2004(2):16-19,36.
GUO Yanshen, ZHENG Shengguo, DUAN Lianguo. Study on unit fuzzy importance evaluation of mini-type motive power [J]. Movable Power Station & Vehicle, 2004(2):16-19,36.
- [21] 李青,陆廷金.模糊重要度分析方法的研究[J].模糊系统与数学,2000,14(1):89-93.
LI Qing, LU Tingjin. The study on the methods of fuzzy significance analysis[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(1):89-93.
- [22] 李青,陆廷金,李宁萍,等.三角模糊数的模糊故障树分析及其应用[J].中国矿业大学学报(自然科学版),2000,29(1):56-59.
LI Qing, LU Tingjin, LI Ningping, et al. Fuzzy fault tree analysis with triangular fuzzy number and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1):56-59.
- [23] 安慧,黄艾,安敏,等.基于模糊故障树的建筑施工高处坠落全面风险评估[J].科学技术与工程,2022,22(19):8568-8576.
AN Hui, HUANG Ai, AN Min, et al. Comprehensive risk assessment of building construction falling from height based on fuzzy fault tree [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19):8568-8576.
- [24] 王铭文,金长泽,王子孝.模糊数学讲义[M].长春:东北师范大学出版社,1988.
WANG Mingwen, JIN Changze, WANG Zixiao. Fuzzy Mathematics Handout[M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1988.
- [25] 周晓,柯红刚,赵海燕,等.火控计算机系统可靠性的模糊故障树分析[J].电光与控制,2009,16(2):81-83.
ZHOU Xiao, KE Honggang, ZHAO Haiyan, et al. Fuzzy fault tree analysis of fire control computer system's reliability [J]. Electronis Optics & Control, 2009, 16(2):81-83.
- [26] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.
XIE Jijian, LIU Chengping. Fuzzy Mathematical Method and Its Application [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2005.
- [27] 闫明礼,张东刚.CFG桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
YAN Mingli, ZHANG Donggang. Technology and Engineering Practice of CFG Pile Composite Foundation[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001.
- [28] 冯玉国,孙瑞仁,陈文才.长螺旋钻管内泵压CFG桩成桩工艺堵管故障树分析[J].建筑机械化,2004(4):27-29.
FENG Yuguo, SUN Ruiren, CHEN Wencai. The fault tree analysis of mix-material blocking pipe to CFG pile with long screwy drill pipe inner pump pressure[J]. Construction Mechanization, 2004(4):27-29.
- [29] 邵国霞,曹政国.基于三角模糊数-TOPSIS的既有高铁近接地基加固方案优选[J].铁道标准设计,2019,63(2):40-44.
SHAO Guoxia, CAO Zhengguo. Scheme optimization of foundation reinforcement approaching existing high-speed railway based on triangular fuzzy number-TOPSIS[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(2):40-44.
- [30] 冯玉国.长螺旋钻管内泵压CFG桩成桩工艺混合料堵管的原因及预防措施[J].地质装备,2003(1):3-8.
FENG Yuguo. The clog pipe reasons of mix-material to CFG pile technology of long twist auger pump pressure in pipe and precautionary measures[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2003(1):3-8.

(编辑 王文)