

深井煤巷锚杆支护失效的模糊故障树分析

王平^{1,2}, 冯涛^{2,3*}, 朱永建²

(1.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;
2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;
3.湖南科技大学 页岩气资源利用湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:采用故障树(FTA)对深井煤巷锚杆支护失效问题进行了分析.鉴于故障树基本事件发生概率的模糊性,结合模糊集合理论将故障树分析运用于深井煤巷锚杆支护系统之中.运用扩展原理,将基本事件发生概率处理为三角模糊数,根据模糊算子和模糊运算法则得到顶事件发生的概率分布.同时,对构建的模糊故障树进行敏感度分析.研究表明:深井煤巷锚杆支护系统的最关键的环节为实时、动态监测,其次是支护施工质量和环境因素的影响以及支护设计时的反馈修正,然后是锚杆支护设计的参数选取、锚杆支护的“三径”匹配问题,最后还应注意支护材料的质量问题.

关键词:深井煤巷;锚杆支护;故障树;三角模糊数;重要度分析

中图分类号:TD352 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)03-0032-07

Failure Analysis Based on Fuzzy Fault Tree for Bolt Support in Deep Coal Roadway

Wang Ping^{1,2}, Feng Tao^{2,3}, Zhu Yongjian²

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: For deep coal roadway bolt support failure problem, fault tree analysis (FTA) is used for analysis. Considering the ambiguity of fuzzy fault tree basic cause event and combining the fuzzy set theory, fuzzy fault tree analysis is used in deep coal roadway bolting failure analysis and evaluation. The probability of the basic cause events are treated as triangular fuzzy number by using extension principle, according to the fuzzy operators and fuzzy algorithms to get the possibility of top event probable distribution. In addition, the fuzzy importance analysis is done for the fuzzy fault tree. Studies show that, the key aspect of deep coal roadway bolt support system is real-time, dynamic monitoring. The followed is the impact of construction quality, environmental factors and the feedback support design, while bolt support design parameters selected, the “three diameters” matching problem of bolt support, the quality of support-related materials and other issues are needed to pay more attention.

Keywords: deep coal roadway; bolt support; fault tree; triangular fuzzy numbers; fuzzy importance analysis

目前,锚杆支护广泛应用于煤巷围岩控制,并取得了显著的经济效益.但是随着煤矿开采逐渐向深部发展,煤巷锚杆支护面临着许多新的困难^[1],锚杆支护的可靠性、稳定性难以保证^[2].地质力学环境的恶

收稿日期:2017-02-28

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51434006);国家自然科学基金资助项目(51374106);湖南科技大学页岩气资源利用湖南省重点实验室开放基金资助项目(E21614)

*通信作者,E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

化、不科学的支护设计方法以及施工、监测人员的工作不到位等原因造成了深部煤巷冒顶事故频发,给矿山企业带来了巨大的经济损失.因此,亟需建立一个可靠的分析模型对锚杆支护系统进行失效分析.故障树分析(FTA)能够辨识和评价系统中的关键故障因素,并对各事件的重要度进行分析^[3].但是,传统的FTA是以概率论和布尔代数为基础,要求精确已知各基本事件发生的概率,而实际工程中要确定各基本事件发生的概率是非常困难的,仅仅采用传统故障树分析缺乏灵活性,为充分利用现有的统计数据,将模糊数引入传统的故障树分析当中,利用扩张原理对各基本事件发生的概率采用模糊数处理,这样就能定量地按照将模糊数运算规则估算出顶事件发生概率的可能性分布^[4].为揭示深井煤巷锚杆支护系统中的不协调因素,提高支护系统的稳定性和可靠性提供一种较为合理的方法.

1 构建故障树

故障树分析(FTA)是从特定的故障事件开始,利用故障树识别可能引起系统失效的各种原因事件及其相互关系的因果演绎分析法,它侧重于对失效源事件的控制,从而估计系统失效的风险概率^[5].具体分析流程见图 1 所示.

由于故障树分析中的顶事件是各基本事件可能导致的最终结果,是很可能发生的事件.故障树构建是否合理对系统失效分析有很大的影响,因此,与系统失效有关的基本事件才能纳入故障树中.深井煤巷锚杆支护系统失效的原因涉及环境因素、人的因素、技术因素、以及管理因素等多个方面.本文基于大量统计调查和查阅大量文献的基础上,构建出深井煤巷锚杆支护系统失效的故障树,并经规范化处理后如图 2 所示.

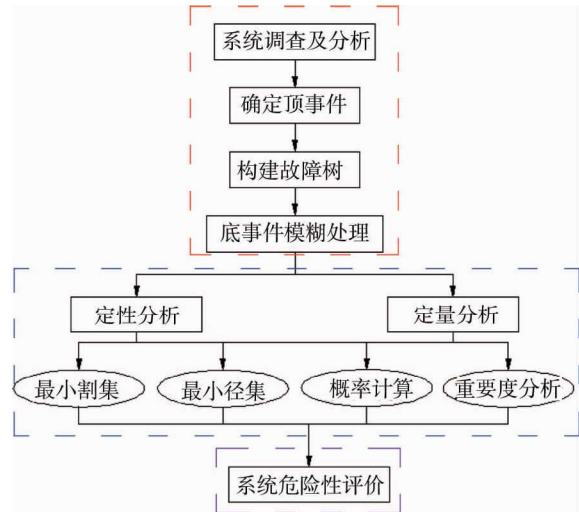


图 1 模糊故障树分析流程

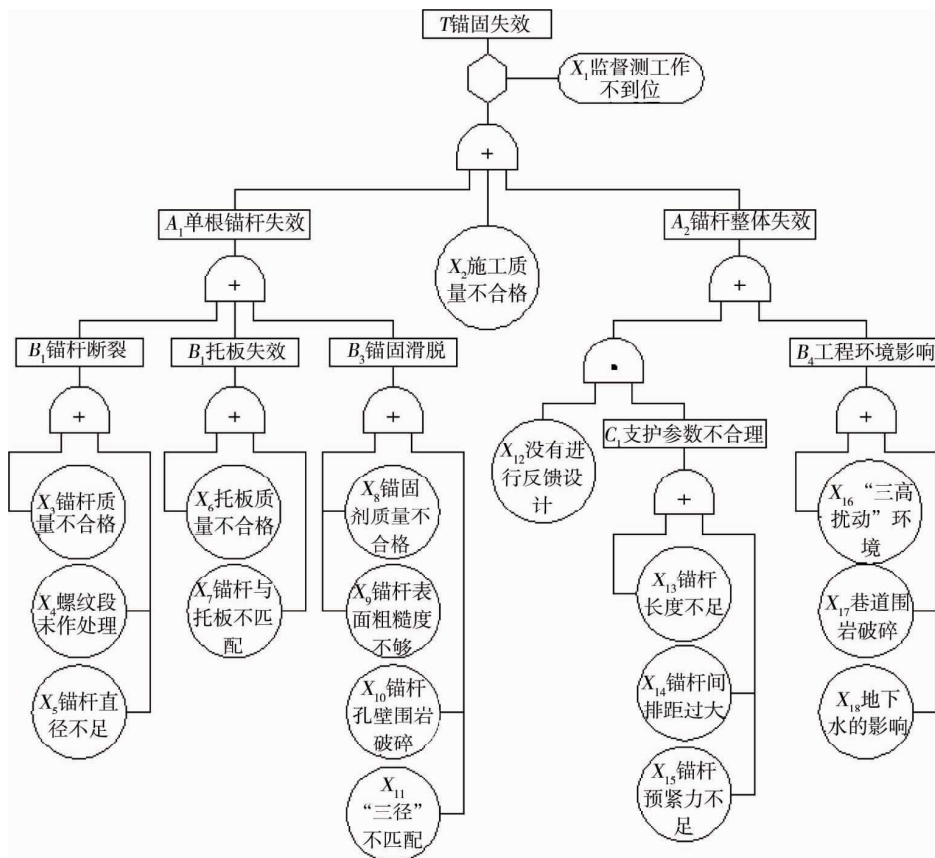


图 2 深井锚杆支护系统故障树

2 深井锚杆支护失效定性分析

故障树分析的主要任务就是要找出导致系统失效的全部故障模式,同时,分析计算发生概率较大的故障路径.在故障树分析中,使顶事件发生的基本事件集合称为割集.若割集中任何基本事件都是对引起顶事件发生的充要条件,则该集合称为最小割集.故障树所有的最小割集均可通过布尔代数得到,图2所示故障树的布尔表达式为

$$T = X_1(A_1 + X_2 + A_2) = B_1 + B_2 + B_3 + X_2 + X_{12}C_1 + B_4 = X_1(X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11}) + X_1X_2 + X_1(X_{12}C_1 + X_{16} + X_{17} + X_{18}) = X_1X_3 + X_1X_4 + X_1X_5 + X_1X_6 + X_1X_7 + X_1X_8 + X_1X_9 + X_1X_{10} + X_1X_{11} + X_1X_2 + X_1X_{12}X_{13} + X_1X_{12}X_{14} + X_1X_{12}X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18}.$$

该故障树的最小割集共有16个:

$$(X_1, X_3), (X_1, X_4), (X_1, X_5), (X_1, X_6), (X_1, X_7), (X_1, X_8), (X_1, X_9), (X_1, X_{10}), (X_1, X_{11}), (X_1, X_2), (X_1, X_{12}, X_{13}), (X_1, X_{12}, X_{14}), (X_1, X_{12}, X_{15}), (X_{16}), (X_{17}), (X_{18}).$$

各基本事件的结构重要度通常采用如下公式计算^[6]:

$$I_{\Phi}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}. \quad (1)$$

式中: k 为故障树的最小割集总数; n 为含有第 i 个事件的最小割数目; R_j 为包含事件 i 的第 j 个最小割集中基本事件的数目.

得到各基本事件的结构重要度并按大小排序分别为: $I_{\Phi}(1) = 0.375 > I_{\Phi}(12) = I_{\Phi}(16) = I_{\Phi}(17) = I_{\Phi}(18) = 0.0625 > I_{\Phi}(2) = I_{\Phi}(3) = I_{\Phi}(4) = I_{\Phi}(5) = I_{\Phi}(6) = I_{\Phi}(7) = I_{\Phi}(8) = I_{\Phi}(9) = I_{\Phi}(10) = I_{\Phi}(11) = 0.03125 > I_{\Phi}(13) = I_{\Phi}(14) = I_{\Phi}(15) = 0.02083$.

根据结构重要度的分析,可以定性地了解各基本事件对顶事件的影响程度,识别出引起顶事件发生的关键因素.采用层次分析法,将影响深井煤巷锚杆支护失效的基本事件划分为4个层次,不同层次的事件,其影响程度也不同,第1层次的事件影响程度最大,其余层次影响程度依次递减.

由重要度定性分析可以看出无论是单根锚杆还是多根锚杆的失效,监测工作都是关键.因此,第1层次的关键因素为“监测工作不到位”,这主要受人的因素以及监测设备和方法的影响,其中人的因素又包括监测人员的专业技能和素质,监测管理制度是否完善等因素.

第2层次的关键因素为“工程环境影响”和锚固设计时的“反馈设计”.众所周知,深井煤巷有着不同于浅埋巷道的更加复杂的物化及力学环境,高地应力、高地热、高渗透压以及强烈的开采扰动是典型深井煤巷的特点.此外,深部巷道围岩普遍具有巷道围岩破碎,地下水影响严重等问题.“反馈设计”是现代支护中一种重要的设计理念,正是由于其工程环境的复杂性和不确定性,深井煤巷锚杆支护同样需要不断的监测、反馈和修正设计.

第3层次的影响因素包括“施工质量”以及“锚杆及其构件材料的质量”.施工质量主要受到人、施工材料和施工方法的影响.其中,以人的影响为主,主要是施工人员和施工管理人员的素质、施工组织方式、施工管理制度等方面的影响.同时,施工配套机具的质量,采用的施工工艺、施工顺序以及施工方法等因素也会对施工质量产生较大的影响.深井煤巷锚杆支护系统的主要支护结构就是锚杆及其构件,若是锚杆及其构件的质量不合格,那么支护效果必然受到影响.

第4层次的影响因素主要是“支护参数不合理”,这一层次因素可归结为技术因素,它主要受到设计者的经验、设计方法和手段,以及其对巷道情况的了解程度的影响.同时,还要考虑到支护成本、支护有效期等因素.

综上所述,影响深井煤巷锚杆支护系统失效的基本事件很多,对顶事件的影响程度也各不相同,基本事件发生概率的模糊性决定了定量地确定顶事件发生的概率是不可能的,也是不合理的.但是,实际工程上还是有许多经验可以借鉴,许多故障事件可以统计,这些都为故障事件的发生概率提供了基础数据.采用模糊数代替基本事件发生概率,通过模糊集合的 λ -截集确定各事件发生概率的最大可能性分布,以此来定量计算顶事件发生的最大可能性概率分布.同时,对各基本事件进行敏感度分析,结合前面的重要度分析,对各基本事件对顶事件发生的贡献做出更加合理的评价.

3 故障树模糊处理及定量分析

3.1 基本事件发生概率模糊处理

采用模糊数代替各基本事件的发生率,同时结合锚杆支护的工程特性和专家经验来构造模糊数的隶属函数,从而能够得到较为准确的顶事件发生的概率区间.设 \bar{A} 是论域 X 在 $(+\infty, -\infty)$ 上的连续模糊子集,其凸隶属函数满足 $\max_{x \in X} u_{\bar{A}}(x) = 1$, 则称 \bar{A} 为 X 上的一个模糊数^[7]. 其中,三角模糊数是最常见的模糊数,令 \bar{A} 为三角模糊数,其隶属度函数为

$$u_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a}, & a \leq x \leq m; \\ \frac{x-b}{m-b}, & m \leq x \leq b; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a, b 为模糊数的左右分布参数; m 为隶属度为 1 的值.

假设 $\bar{A} \in F(x)$, 对任意的 $\lambda \in [0, 1]$, 有 $(\bar{A})_{\lambda} = A_{\lambda} = \{x | \bar{A}(x) \geq \lambda\}$, 称 A_{λ} 为 \bar{A} 的 λ -截集, λ 称为置信水平. 其中 $F(x)$ 为 X 上模糊集的全体. 若三角模糊数 $\bar{A} = [m, a, b]$, 则它的 λ -截集为 $\bar{A}_{\lambda} = [a^{\lambda}, b^{\lambda}] = [a + (m-a)\lambda, b - (b-m)\lambda]$ 是一个区间数^[8], 如图 3 所示.

其中, $[a, b]$ 为支撑区间, $[m, 1]$ 为峰顶点.

假设 \bar{A}, \bar{B} 均为支撑区间属于 R^+ 的三角模糊数, 根据扩展原理, 对 $\forall \lambda \in [0, 1]$ 可得如下运算法则^[9]:

$$\bar{A}_{\lambda} + \bar{B}_{\lambda} = [a_{\lambda}^{\bar{A}}, b_{\lambda}^{\bar{A}}] + [a_{\lambda}^{\bar{B}}, b_{\lambda}^{\bar{B}}] = [a_{\lambda}^{\bar{A}} + a_{\lambda}^{\bar{B}}, a_{\lambda}^{\bar{A}} + b_{\lambda}^{\bar{B}}]; \quad (3)$$

$$\bar{A}_{\lambda} - \bar{B}_{\lambda} = [a_{\lambda}^{\bar{A}}, b_{\lambda}^{\bar{A}}] - [a_{\lambda}^{\bar{B}}, b_{\lambda}^{\bar{B}}] = [a_{\lambda}^{\bar{A}} - a_{\lambda}^{\bar{B}}, b_{\lambda}^{\bar{A}} - b_{\lambda}^{\bar{B}}]; \quad (4)$$

$$\bar{A}_{\lambda} \times \bar{B}_{\lambda} = [a_{\lambda}^{\bar{A}}, b_{\lambda}^{\bar{A}}] \times [a_{\lambda}^{\bar{B}}, b_{\lambda}^{\bar{B}}] = [a_{\lambda}^{\bar{A}} \times a_{\lambda}^{\bar{B}}, b_{\lambda}^{\bar{A}} \times b_{\lambda}^{\bar{B}}]; \quad (5)$$

$$\frac{\bar{A}_{\lambda}}{\bar{B}_{\lambda}} = \frac{[a_{\lambda}^{\bar{A}}, b_{\lambda}^{\bar{A}}]}{[a_{\lambda}^{\bar{B}}, b_{\lambda}^{\bar{B}}]} = \left[\frac{a_{\lambda}^{\bar{A}}}{b_{\lambda}^{\bar{B}}}, \frac{a_{\lambda}^{\bar{A}}}{b_{\lambda}^{\bar{B}}} \right]. \quad (6)$$

根据模糊数运算法则可得模糊故障树中的与门结构算子与或门结构算子分别为^[10]

$$\bar{A}_T^{\text{and}} = \prod_{i=1}^n \bar{A}_i = \bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 \cdots \bar{A}_n = \left[\prod_{i=1}^n [a_i + (m_i - a_i) \cdot \lambda], \prod_{i=1}^n [b_i - (b_i - m_i) \cdot \lambda] \right]; \quad (7)$$

$$\bar{A}_T^{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \bar{A}_i) = \left[1 - \prod_{i=1}^n [1 - a_i - (a_i - m_i) \cdot \lambda], 1 - \prod_{i=1}^n [1 - b_i + (m_i - b_i) \cdot \lambda] \right]. \quad (8)$$

在模糊故障树分析中, 将各基本事件的故障率作模糊数 \bar{A}_i 处理, 则顶事件的故障率 $\bar{A}_T = \tilde{\Phi}(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_n)$, 其中 $\tilde{\Phi}$ 为整个系统的模糊结构函数, 根据式(7)和式(8)可得到模糊故障树顶事件发生的模糊数分布区间.

监测工作质量 X_1 和施工质量 X_2 受到监测和施工设备、监测和施工制度以及相关人员素质的综合影响, 属于条件基本事件; 锚杆孔壁围岩破碎 X_{10} 与岩体力学特征、钻孔机械以及钻孔人员有关, 也属于条件基本事件; 没有进行反馈设计 X_{12} , 同样也属于条件基本事件. 这一类事件的发生概率根据专家经验估计得到, 根据三角模糊数的构成法则, 假设有:

$$a_i^{\lambda} = 0.95m_i^{\lambda}; \quad (9)$$

$$b_i^{\lambda} = 1.05m_i^{\lambda}. \quad (10)$$

锚杆质量、托板质量、锚固剂质量以及相关的构件的质量和匹配问题, 这一类基本事件的发生概率为随机事件, 可以通过现场抽样检测和类似矿山的统计资料来确定. 这一类基本事件有 11 个: $X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{11}, X_{13}, X_{14}, X_{15}$. 根据三角模糊数的构成法则, 假设有:

$$a_i^{\lambda} = 0.9m_i^{\lambda}; \quad (11)$$

$$b_i^{\lambda} = 1.1m_i^{\lambda}. \quad (12)$$

工程环境对锚杆支护效果的影响程度是一种客观存在的却又难以精确确定的一类基本事件, 这类事

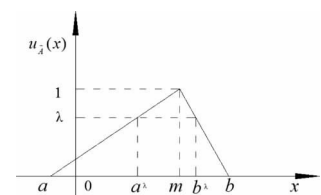


图3 三角模糊数

件基本上肯定会发生,其影响程度是通过专家估计给定一个影响程度的百分率.其三角模糊数的构成同式(9)和式(10).各基本事件发生的概率模糊数如表1所示.

表1 基本事件发生概率模糊数

事件代号	原因事件	m_i^λ	a_i^λ	b_i^λ	M_{Tei}^λ	S_{Ti}
X_1	监测工作不到位	0.092	0.087 4	0.096 6	0.000 0	0.093 6
X_2	施工质量不合格	0.106	0.100 7	0.111 3	0.083 9	0.009 7
X_3	锚杆质量不合格	0.013	0.011 7	0.014 3	0.092 4	0.001 2
X_4	螺纹段未作处理	0.012	0.010 8	0.013 2	0.092 5	0.001 1
X_5	锚杆直径不足	0.025	0.022 5	0.027 5	0.091 3	0.002 3
X_6	托板质量不合格	0.022	0.019 8	0.024 2	0.091 6	0.002 0
X_7	托板与锚杆不匹配	0.013	0.011 7	0.014 3	0.092 4	0.001 2
X_8	锚固剂质量不合格	0.033	0.029 7	0.036 3	0.090 6	0.003 0
X_9	锚杆表面粗糙度不够	0.035	0.031 5	0.038 5	0.090 4	0.003 2
X_{10}	锚杆孔壁围岩破碎	0.056	0.053 2	0.058 8	0.088 5	0.005 1
X_{11}	“三径”不匹配	0.061	0.054 9	0.067 1	0.088 0	0.005 6
X_{12}	没进行反馈设计	0.073	0.069 4	0.076 7	0.073 9	0.019 7
X_{13}	锚杆长度不足	0.048	0.043 2	0.052 8	0.087 7	0.005 9
X_{14}	锚杆间排距过大	0.052	0.046 8	0.057 2	0.087 5	0.006 1
X_{15}	锚杆预紧力不足	0.081	0.072 9	0.089 1	0.085 9	0.007 7
X_{16}	“三高一扰动”影响	0.191	0.181 5	0.200 6	0.076 0	0.017 6
X_{17}	巷道围岩破碎	0.142	0.134 9	0.149 1	0.080 5	0.013 1
X_{18}	地下水的影	0.094	0.089 3	0.098 7	0.085 0	0.008 6

3.2 顶事件发生概率

顶事件发生的概率是故障树的结构函数值等于1时的概率,前文构建的故障树最小割集有16个,即引起顶事件发生的16种故障模式,最小割集的发生概率等于其中的基本事件用逻辑与门连接,整个故障树等于各个最小割集用逻辑或门连接^[6],因此,采用独立事件和的公式求顶事件的发生概率 P_T :

$$P_T = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p(M_i)]. \quad (13)$$

式中: $p(M_i)$ 表示第*i*个最小割集发生概率.

根据表1和式(11)以及式(12),可求得顶事件发生概率在置信水平 λ 为95%时的三角模糊数为(0.393 1, 0.413 8, 0.434 4)即顶事件的发生概率为39.31%~43.44%,最有可能发生的概率为41.38%,其隶属度为1.一般情况下,三角模糊数经过乘法运算之后就不再是三角模糊数,但是其峰值点(即隶属度 $\mu=1$ 的点)相同,对于有限次乘法运算中,仍可近似采用三角模糊数近似表示.其误差在5.4%^[11]左右,对于深部工程而言,这个误差是可以接受的.

3.3 模糊敏感度分析

敏感度是系统的一个割集发生对顶事件发生的贡献,它在系统的稳定性分析中起着指导作用.模糊故障树的敏感度以模糊概率来表示,其数学表达式如下^[12]:

$$I_k = F_s("S" = A_i "k" = B_j) - F_s("S" = A_i "k" = A_j). \quad (14)$$

式中: $F_s("S" = A_i "k" = B_j)$ 表示第*k*个单元发生模糊故障 B_j 时,系统关于模糊功能 A_i 的模糊不可靠度; $F_s("S" = A_i "k" = A_j)$ 表示第*k*个单元发生模糊故障 A_j 时,系统关于模糊功能 A_i 的模糊不可靠度.

目前,模糊敏感度分析法主要有Hideo Tanka^[13]提出的模糊敏感度分析法、重心法^[14]和中值法^[15],本文以中值法为例作简要介绍.假设模糊数 \bar{A} 为正有界闭模糊数,则有:

$$\bar{A}(x) = \begin{cases} 1, & x = m; \\ L(x), & x < m; \\ R(x), & x > m. \end{cases} \quad (15)$$

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

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} R(x) = 0.$$

令 $A_1 = \int_0^m L(x) dx, A_2 = \int_m^{\infty} R(x) dx, A = A_1 + A_2$, 存在点 m_e 使得模糊曲线的面积被直线 $x = m_e$ 平分, 则 m_e

为 \bar{A} 的中位数. 假设模糊数 \bar{A}_1, \bar{A}_2 的中位数分别为 m_{e1}, m_{e2} , 若 $m_{e1} > m_{e2}$, 则认为 $\bar{A}_1 > \bar{A}_2$; 若 $m_{e1} = m_{e2}$, 则认为 $\bar{A}_1 = \bar{A}_2$; 若 $m_{e1} < m_{e2}$, 则认为 $\bar{A}_1 < \bar{A}_2$.

若各基本事件的模糊数 \tilde{x}_i 为正有界闭模糊数, 则模糊故障树的顶事件模糊数为

$$\bar{T} = \Phi(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) = [m_T, L_T(x), R_T(x)]. \quad (16)$$

\bar{T} 仍为正有界闭模糊数, 其中位数为 m_{Te} , 当基本事件的模糊数 $\tilde{x}_i = 0$ 时, 顶事件的模糊数为

$$\bar{T}_i = \Phi(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{i-1}, 0, \tilde{x}_{i+1}, \dots, \tilde{x}_n) = [m_{Tei}, L_{Tei}(x), R_{Tei}(x)]. \quad (17)$$

\bar{T}_i 仍为有界闭模糊数, 其中位数为 m_{Tei} , 则定义基本事件 x_i 的模糊敏感度为

$$S_{Ti} = m_{Te} - m_{Tei}. \quad (18)$$

由表1中模糊数可得中间事件和顶事件发生的模糊数, 如表2所示.

表2 中间事件及顶事件发生模糊数

事件代号	中间及顶事件	m_i^A	a_i^A	b_i^A
T	锚固失效	0.093 6	0.081 8	0.082 5
A_1	单根锚杆失效	0.270 0	0.245 8	0.294 2
A_2	锚体整体失效	0.641 5	0.589 0	0.696 1
B_1	锚杆断裂	0.050 0	0.045 0	0.055 0
B_2	托板失效	0.035 0	0.031 5	0.038 5
B_3	锚固滑脱	0.185 0	0.169 3	0.200 7
B_4	工程环境影响	0.427 0	0.405 7	0.448 4
C_1	支护参数不合理	0.429 0	0.386 1	0.471 9

根据模糊敏感度分析方法对深井煤巷锚杆支护系统各原因事件的模糊敏感度进行分析. 中心三角模糊数的中位数 m_{Tei} 就是各模糊数的主值 m_i^A , 可得到各基本事件不发生时, 顶事件的中位数, 见表1所示. 模糊敏感度从大到小依次为 $S_{T1} > S_{T12} > S_{T16} > S_{T17} > S_{T2} > S_{T18} > S_{T15} > S_{T14} > S_{T13} > S_{T11} > S_{T10} > S_{T9} > S_{T8} > S_{T5} > S_{T6} > S_{T7} > S_{T3} > S_{T4}$. 同样, 将基本事件敏感度划分为4个层次. 从各基本事件敏感度可以看出“监测工作不到位”事件的敏感度远远大于其他基本事件的敏感度. 因此, 对深井煤巷锚杆支护系统而言, 实时、动态可靠地监测仍是第1层次的关键环节, 也是最重要、最敏感的因素. 属于第2敏感度层次的基本事件有5个: “没有进行反馈设计”、“三高一扰动影响”、“巷道围岩破碎”、“地下水的应先”和“施工质量不合格”. 现代支护讲究动态支护, 支护设计需要经过反复的监测、反馈、修改设计. 同时, 深部工程岩体对环境非常敏感, 而支护效果的好坏对支护施工质量非常地依赖. 第3层次的敏感度层次基本事件也有5个: “锚杆预紧力不足”、“锚杆间排距过大”、“锚杆长度不足”、“三径不匹配”、“锚杆孔壁围岩破碎”. 这类基本事件归结为技术性因素, 是需要支护设计者格外注意的因素. 属于第4层次敏感度层次的基本事件有7个: “锚杆质量不合格”、“锚杆螺纹段未做处理”、“锚杆直径不足”、“托板质量不合格”、“锚杆与托板不匹配”、“锚固剂质量不合格”、“锚杆表面粗糙度不够”. 这些因素可归结为支护材料及其构件的质量和匹配问题, 随着锚杆支护的不断发展, 支护材料的质量也在不断的改善, 因此, 对于现代支护而言, 支护材料的质量及其匹配问题不再是支护的主要问题, 但仍是需要注意的问题.

根据传统故障树的定性分析和模糊故障树的定量分析可以看出, 深井锚杆支护系统的关键因素层次基本相同, 这说明了将模糊数引入故障树分析是合理. 同时, 局部也有不同之处, 例如, 从结构重要度来看 $I_{\Phi}(18) > I_{\Phi}(2)$, 从敏感度来看却是 $S_{T2} > S_{T18}$; 从结构重要度来看 $I_{\Phi}(2) = I_{\Phi}(3) = I_{\Phi}(4) = I_{\Phi}(5) = I_{\Phi}(6) = I_{\Phi}(7) = I_{\Phi}(8) = I_{\Phi}(9) = I_{\Phi}(10) = I_{\Phi}(11) > I_{\Phi}(13) = I_{\Phi}(14) = I_{\Phi}(15)$, 而从敏感度来看有: $S_{T15} > S_{T14} > S_{T13} > S_{T11} > S_{T10} > S_{T9} > S_{T8} > S_{T5} > S_{T6} > S_{T7} > S_{T3} > S_{T4}$. 2种结果局部的不同, 主要是自身的算法和计算依据不同. 根据实际统计数据得出的敏感度 $S_{T2} > S_{T18}$ 显然要比结构重要度 $I_{\Phi}(18) > I_{\Phi}(2)$ 更为合理, 因为实际工程中施工质量的好坏对锚杆支护效果的影响更大; 深井煤巷锚杆支护参数的选取显然要比支护材料及其相关构件的

配套更加重要,因为,相关材料的参数都是在设计阶段确定的.所以可以看出模糊故障树分析是对传统故障树的有力补充和完善.

4 结论

1) 导致深井煤巷锚杆支护系统支护失效的基本事件至少有 18 个,他们之间的重要度关系为 $I_{\Phi}(1) > I_{\Phi}(12) = I_{\Phi}(16) = I_{\Phi}(17) = I_{\Phi}(18) > I_{\Phi}(2) = I_{\Phi}(3) = I_{\Phi}(4) = I_{\Phi}(5) = I_{\Phi}(6) = I_{\Phi}(7) = I_{\Phi}(8) = I_{\Phi}(9) = I_{\Phi}(10) = I_{\Phi}(11) > I_{\Phi}(13) = I_{\Phi}(14) = I_{\Phi}(15)$.

2) 顶事件的发生的可能性分布为 39.31%~43.44%,发生可能性最大的概率为 41.38%.根据模糊故障树分析得到各基本事件的敏感性关系如文中所述.

3) 深井煤巷锚杆支护系统的关键环节是实时、动态监测,其次是支护施工质量和环境因素的影响以及支护设计时的反馈设计,同时,锚杆支护设计的参数选取、锚杆支护的“三径”匹配问题,支护相关材料的质量等问题都需要格外重视.

4) 本文 2 种方法都能分析出对系统最重要的因素,但是局部深入分析方面模糊故障树更具有优势,分析也更合理.模糊故障树分析是故障树分析的重要补充和改进.

参考文献:

- [1] 王金华.我国煤巷锚杆支护技术的新发展[J].煤炭学报,2007,32(2):113-118.
- [2] 何满潮,苏永华,孙晓明,等.锚杆支护煤巷稳定性可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1810-1814.
- [3] 朱永建,马念杰,师皓宇,等.煤巷顶板锚杆支护危险性评价研究[J].煤矿安全,2006,37(1):1-3.
- [4] 李建平,余建星.模糊故障树分析方法在工程质量风险分析中的应用[J].水利水电技术,2008,39(2):45-48.
- [5] 仲景冰,李慧强,吴静.工程失败的路径及风险源因素的 FTA 分析方法[J].华中科技大学学报(城市科学版),2003,20(1):14-17.
- [6] 陈宝智.矿山安全工程[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [7] 赵艳萍,贡文伟.模糊故障树分析及其应用[J].中国安全科学学报,2001,11(6):31-35.
- [8] 曹炳元.应用模糊数学与系统[M].北京:科学出版社,2005:8-14.
- [9] 边亦海,黄宏伟.SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J].2006,28(5):664-668.
- [10] 肖丹,秦文贵,邱志强.模糊故障树分析法及其在矿井水灾评价中的应用[J].矿业安全与环保,2006,33(5):43-45.
- [11] 郑俊杰,林池峰,赵冬安,等.基于模糊故障树的盾构隧道施工成本风险评估[J].岩土工程学报,2011,33(4):501-508.
- [12] 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.
- [13] Tanaka H, Fan L T, Lai F S, et al. Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, R-32(5):453-457.
- [14] 王永传,郁文贤,庄钊文.一种故障树模糊重要度分析的新方法[J].国防科技大学学报,1999,21(3):63-66.
- [15] 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,2000,29(1):56-59.