

中文引用格式:赵博. 采空区路堤边坡滑塌的风险评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 121-126.

英文引用格式:ZHAO Bo. Risk assessment model for embankment slope failure in mining goafs[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 121-126.

采空区路堤边坡滑塌的风险评估模型^{*}

赵博^{1,2} 副教授

(1 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024;

2 自然资源部 重大工程地质安全风险防控工程技术创新中心, 北京 100083)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0206

基金项目: 山西省回国留学人员科研教研项目(2023-084); 自然资源部重大工程地质安全风险防控工程技术创新中心开放课题基金资助(TICRPC-2025-05)。

【摘要】 为解决采空区路堤边坡滑塌风险评估中存在的确定性与多态故障难以准确描述的问题, 提出一种基于改进 T-S 模糊故障树的采空区路堤边坡滑塌风险评估模型。首先, 引入高斯模糊数表征各基本事件的故障状态和发生概率, 以处理传统故障分析中对数据精确概率的过度依赖, 以及事件中间状态表达不足的局限; 然后, 采用 T-S 模糊模型替代传统逻辑门中的“与”“或”关系, 刻画事件间的不确定性和模糊信息特征, 进而推导出边坡发生滑塌的故障概率; 最后, 通过工程实例进行验证。结果表明: 该方法能降低故障树的建立难度, 能够识别边坡滑塌的关键致险因子, 并给出其影响程度排序, 反映出滑塌事件与各因素间的内在关联。

【关键词】 采空区; 路堤边坡; 滑塌; T-S 模糊故障树; 高斯模糊数; 风险评估

Risk assessment model for embankment slope failure in mining goafs

ZHAO Bo^{1,2}

(1 College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;

2 Technology Innovation Center for Risk Prevention and Control of Major Project Geosafety,
Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the challenges in accurately describing uncertainty and multiple failure modes in the risk assessment of embankment slope failures in goaf areas, a risk assessment model based on an improved T-S fuzzy fault tree approach was proposed. Initially, Gaussian fuzzy numbers were introduced to characterize the failure states and occurrence probabilities of basic events, thereby addressing the over-reliance on precise probabilistic data in conventional fault tree analysis and the insufficient representation of intermediate event states. Subsequently, T-S fuzzy model was employed to replace traditional AND/OR relationships in logic gates, capturing the uncertainty and fuzzy characteristics among events, and thereby deriving the failure probability of slope collapse. Finally, an engineering case study was conducted for validation. The results demonstrate that the proposed approach simplifies the fault tree construction, identifies the key risk factors leading to slope failure, provides a ranking of their influence, and reveal the intrinsic relationships between failure events and various factors.

Keywords: mining goafs; embankment slopes; collapse; Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy fault tree; gaussian fuzzy number; risk assessment

0 引言

随着我国交通基础设施的大规模建设,一些道路工程不可避免地需要穿越采空区,涌现出大量的采空区路堤边坡工程。由于其结构类型独特、地质条件复杂、工程稳定性差,导致安全性问题尤为突出,时常发生的滑塌事故给当地造成了大量的生命和财产损失^[1-2]。因此,开展针对采空区路堤边坡滑塌的风险评估具有重要的现实意义和应用价值。

尽管国内外在边坡风险方面做了大量研究,提出蒙特卡罗法、支持向量机、层次分析法、数值模拟方法、模型试验法、风险矩阵法和模糊评价法等多种方法^[3-5]。然而,近年来随着工程规模的不断扩大,系统的复杂性逐步增加,这些传统方法逐渐暴露出一些局限性,如无法有效识别并演绎推理出对边坡影响较大的关键因子,通常只能单一地评估边坡滑塌发生的可能性;加之系统本身和外界环境中存在众多随机性、不确定性和模糊性,它们难以全面、有效刻画与融合这些复杂特征并进行综合处理,从而影响了分析评估结果的准确性和可信度。

Takagi-Sugeno(T-S)模糊故障树作为一种融合了模糊逻辑和传统故障树分析方法的系统故障分析工具,能够动态处理复杂系统中的模糊性和不确定性等问题,可将系统的多种模糊状态准确量化,演绎推理出各因素对系统的影响路径和复杂关联,已广泛应用于各个工程领域^[6-8]。钟国强等^[9]构建了一种基于T-S模糊故障树的地连墙+支撑支护基坑坍塌评价方法,降低了故障树建立的复杂性。刘若君等^[10]采用T-S模糊故障树研究了煤矿坑道钻机液压动力系统的故障诊断问题,明确各底事件的重要度排序,识别出在不同故障程度时液压动力系统的薄弱环节。尽管T-S模糊故障树方法在可靠性研究中取得了丰硕成果,但在采空区工程领域应用的相关文献报道极少,尤其是针对复杂条件下采空区路堤边坡滑塌灾害的风险评估方面缺乏系统性研究,远不能满足工程实际的需求,缺乏有效的理论模型与实践支持。

鉴于此,笔者拟将T-S模糊故障树方法引入采空区路堤边坡研究中,构建起一种采空区路堤边坡滑塌的风险评估模型,细致描述复杂系统中故障的因果关系和逻辑推理过程,以期为采空区道路工程的防灾减灾提供一种科学的分析方法与工具。

1 T-S 模糊故障树理论

T-S模糊故障树是一种基于倒立树状逻辑的因果关系统,结合模糊逻辑和故障树的分析方法^[11]。T-S模糊故障树结构模型由顶事件、中间事件、基本事件和T-S模糊门所组成。其分析过程采用自上而下的演绎推理方法,逐层寻找导致顶事件的所有可能原因事件,直到最底层的基本事件。顶事件表示要分析的系统故障对象,即最不希望发生的事件;中间事件表示导致顶事件发生的中间状态或事件;基本事件是可能引起中间事件或顶事件发生的根本原因。在模型中,T-S模糊门包括AND门(与门)、OR门(或门)、NOT门(非门),用于定义事件之间的逻辑关系。T-S模糊门的逻辑结构如图1所示。

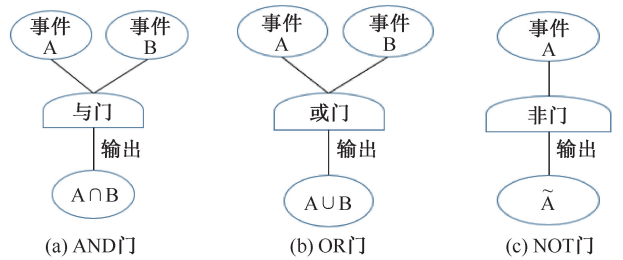


图1 T-S 模糊门
Fig. 1 T-S fuzzy gate

在具体的应用中,T-S模糊故障树模型包含多个层次的中间事件和基本事件,以及若干个逻辑门,以描述复杂系统中故障的因果关系和逻辑推理过程。这种模型为复杂系统可靠性分析提供一种有效的工具,特别是在处理多层次、多模糊性故障事件时表现出独特的优势。

1.1 节点故障描述方法

在传统故障分析中,事件的发生概率通常需要精确的数值。然而,在实际应用中,由于统计数据的缺乏,获取所有基本事件的故障概率往往有困难,概率值可能具有不确定性或模糊性,故采用高斯模糊数^[12]表述节点的故障情况。采用分布在区间 $[0,1]$ 上的模糊数描述事件的故障程度,将故障程度分为3个等级:无故障、中等故障(一般故障)和严重故障,对应的模糊数分别为0、0.5和1.0。

1.2 T-S 模糊模型

T-S模糊模型由若干模糊规则组成,通过模糊算法分解输入变量,并通过模糊推理和去模糊化生成反映输入与输出关系的数学方程^[13]。它利用高斯模糊数描述系统中子部分的多种状态,并将T-S

门中的规则重要度转化为系统不同状态的概率值,最终推导出子部分的 T-S 重要度。

具体的计算步骤如下:

1) 建立 T-S 模糊模型。需要定义系统的输入和输出变量,并为每个变量赋予高斯模糊数;同时,判断是否采用 T-S 模糊故障树分析方法。

假设底层的基本事件 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和上一层事件 y 的故障程度,用模糊数分别描述为 $(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$ 、 $(x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$ 、 $\dots$ 、 $(x_1^{m_1}, x_2^{m_1}, \dots, x_n^{m_1})$ 和 $(y^1, y^2, \dots, y^{m_y})$ 。

2) 定义 T-S 模糊规则。根据系统的故障模式建立模糊规则描述基本事件之间的逻辑关系。每条规则的前提部分包含多个模糊集(如低、中、高),结论部分为系统故障概率。

若 x_1 为 $x_1^{k_1}$ 且 x_2 为 $x_2^{k_2}$ 且 $\dots$ 且 x_n 为 $x_n^{k_n}$, 已知规则 $r = 1, 2, \dots, M$, 则 y 为 y^1 的可能性为 $P^r(y^1)$, y^2 的可能性为 $P^r(y^2)$, y^{m_y} 的可能性为 $P^r(y^{m_y})$ 。其中, $k_1 = 1, 2, \dots, m_1$, $k_2 = 1, 2, \dots, m_2$, $k_n = 1, 2, \dots, m_n$, 规则总数为 $M = m_1 m_2 \dots m_n$ 。

3) 联合模糊推理。它能够有效建模故障事件之间的非线性关系,并考虑多个事件的协同效应,避免传统基于布尔代数的加法或乘法运算的局限性,从而提升复杂系统建模的精细度,并减少传统方法中因不确定性导致的误差。

具体的模糊推理过程如下:

首先,推理每条模糊规则,并进行模糊化;然后,根据模糊规则进行推理,得到模糊结论;最后,通过去模糊化方法将输出变量的模糊值转换为 crisp 值,把模糊结果转换为实际数值。

模糊化:将系统的输入(如故障概率)映射为模糊集,假设某个基本事件的概率为 P ,通过模糊集将其转化为模糊值。

$$P \rightarrow \tilde{P} = \mu_A(P) \quad (1)$$

式中: $\tilde{P}$ 为模糊化后的结果; $\mu_A(P)$ 为模糊集 A 的隶属度函数。

模糊推理:根据规则的权重和输入事件的隶属度,计算系统故障的模糊状态。

$$y = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

式中 ω_i 为规则权重。

去模糊化:通过质心法将模糊结果转换为实际数值。

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \mu_{A_i} f_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i \mu_{A_i}} \quad (3)$$

式中 μ_{A_i} 为输出结果的隶属度函数。

4) 构建故障树。将传统故障树中的基本事件替换为模糊事件,用模糊概率值描述故障的发生概率,而不是简单的“是”或“否”判断。通过模糊推理计算每一层中节点的故障概率,并结合运算规则,最终得到系统顶事件的整体故障概率或可靠性。

5) 模糊可能性计算。假设底层基本事件 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的故障程度为 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, 其各种故障程度的模糊可能性为 $P(x_1^{k_1})$, $P(x_2^{k_2})$, $\dots$, $P(x_n^{k_n})$, 根据构建的 T-S 模糊模型计算出上层事件 $y^j (j = 1, 2, \dots, m_y)$ 的各种故障程度的模糊可能性:

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{r=1}^M \zeta_r(x') P^r(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{r=1}^M \zeta_r(x') P^r(y^2) \\ \vdots \\ P(y^{m_y}) = \sum_{r=1}^M \zeta_r(x') P^r(y^{m_y}) \\ \zeta_r(x') = \frac{\prod_{t=1}^n \mu_{x_t^{st}}(x'_t)}{\sum_{r=1}^M \prod_{t=1}^n \mu_{x_t^{st}}(x'_t)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mu_{x_t^{st}}(x'_t)$ 为第 r 条规则中第 t 个事件 x_t 故障程度 x'_t 对应模糊集的隶属度; $P^r(y^j)$ 为在第 r 个规则下,上级事件 y^j 的模糊可能性。

6) T-S 概率重要度计算,即基本事件重要度分析。基本事件 x 故障程度为 x' ,对系统顶事件 T 为 T_p 的 T-S 概率重要度为:

$$\begin{aligned} I_{T_p}^{\text{Pr}}(x'_i) &= P(T_p, P(x'_i) = 1) - I_{T_p}^{\text{Pr}}(x'_i) = \\ &= P(T_p, P(x'_i) = 1) - P(T_p, P(x'_i) = 0.5) - \\ &= P(T_p, P(x'_i) = 0) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $P(T_p, P(x'_i) = 1)$ 、 $P(T_p, P(x'_i) = 0.5)$ 、 $P(T_p, P(x'_i) = 0)$ 分别为当 x_i 故障程度为 x'_i 的模糊概率 $P(x'_i)$ 为 1、0.5 和 0 时引起系统顶事件 T 为 T_p 的模糊概率。因此,两者的差值是由单独的系统顶事件引起的模糊概率。

综合基本事件的所有非零故障程度,得到基本事件 x_i 对顶事件 T 为 T_p 的 T-S 概率重要度:

$$I_{T_p}^{\text{Pr}}(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^{m'_i} I_T^{\text{Pr}}(x'_i)}{m'_i} \quad (6)$$

式中 m'_i 为第 i 个事件的非 0 故障程度的个数。

2 采空区路堤边坡滑塌风险评估流程

滑塌是采空区路堤边坡工程中最常见的一种灾害事故,也是导致重大伤亡事故的主要灾害形式。基于 T-S 模糊模型分析滑塌的发生概率,并识别关键致险因子,具体的分析流程如图 2 所示。

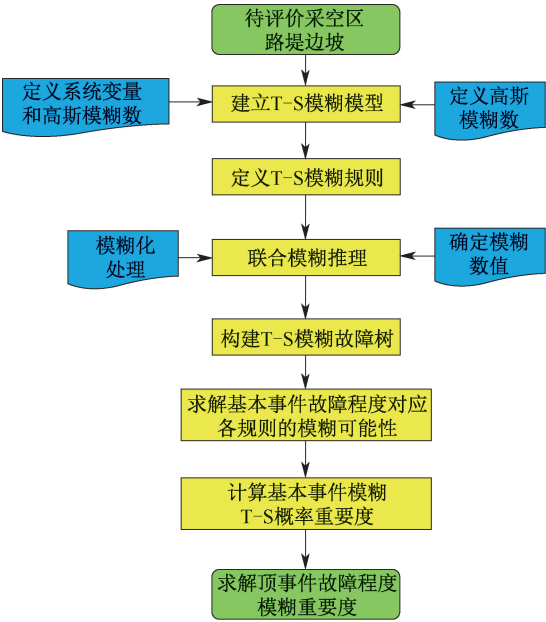


图 2 采空区路堤边坡滑塌风险分析流程

Fig. 2 Risk analysis process for slope collapse of embankments slope in mining goafs

将采空区路堤边坡滑塌作为故障树的顶事件,从自然地质条件、外界干扰条件、维修养护 3 个方面进行系统分析,评价采空区路堤边坡滑塌的发生机制。采空区路堤边坡滑塌的 T-S 模糊故障树如图 3 所示,其中, T 为顶事件、 $x_1 \sim x_{37}$ 为基本事件,其余为中间事件,从上往下按照 A、B、C 的顺序依次编号。各 T-S 门规则通过专家调查法并经加权计算后得到,调查对象覆盖采空区边坡工程全链条技术群体。因篇幅限制,仅列出 T-S 门 12 规则作为示例,见表 1。其中,规则 1 表示:当 $x_7=0, x_8=0$ 时,中间事件 $C_2=0$ 可能性为 1, C_2 为 0.5 和 1 的可能性为 0,其他规则以此类推。随后采用式(5)、式(6)计算出该采空区路堤边坡滑塌的风险概率。

表 1 T-S 门 12 规则

Table 1 Rules of T-S gate 12

规则序号	x_7	x_8	C_2		
			0	0.5	1.0
1	0	0	1.0	0	0
2	0	0.5	0.2	0.7	0.1
3	0	1.0	0	0.4	0.6
4	0.5	0	0.2	0.6	0.2
5	0.5	0.5	0.1	0.6	0.3
6	0.5	1.0	0	0.4	0.6
7	1.0	0	0	0.8	0.2
8	1.0	0.5	0	0.1	0.9
9	1.0	1.0	0	0	1.0

注:表中取值为平均值,四舍五入。

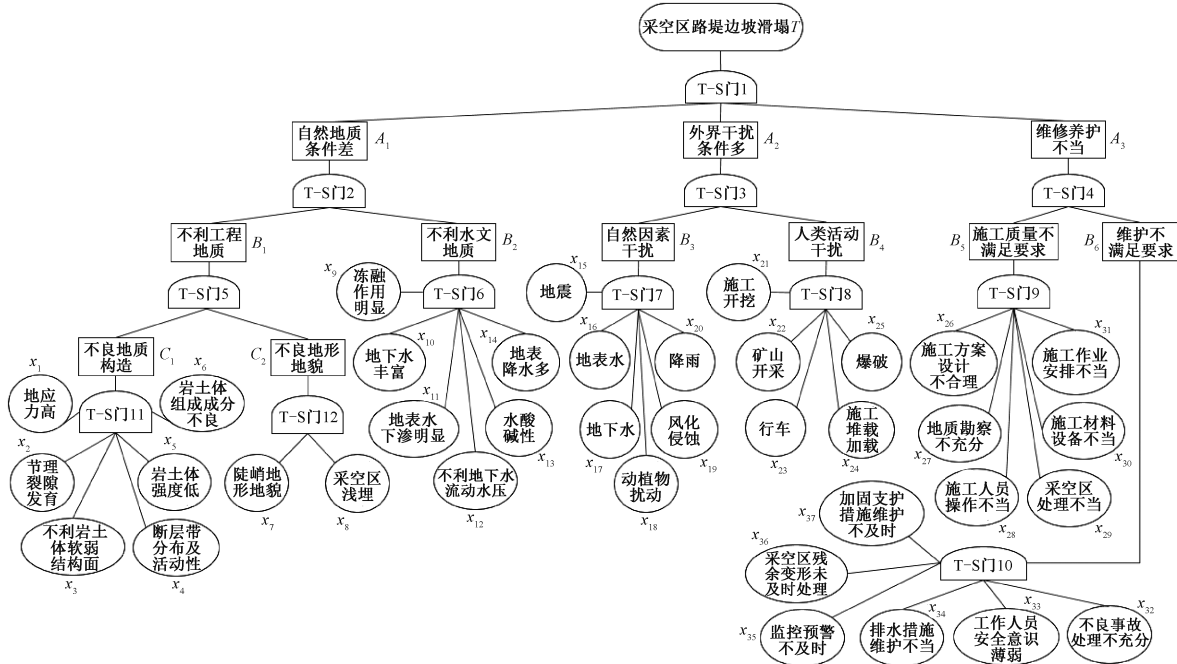


图 3 采空区路堤边坡滑塌的 T-S 模糊故障树

Fig. 3 T-S fuzzy fault tree for embankment slope failure in mining goafs

3 滑塌风险评估模型工程应用

选择滹沱高速部分路段作为研究对象,该路段穿越河南义马千秋煤矿,经过多年来持续性的煤炭开采,该区域形成了大规模的地下采空区域,一旦发生变形破坏将会直接威胁到周边公路等基础设施的安全建设与运营。

按照 T-S 模糊故障树分析流程,分析途径 18081 采空区路段的路堤边坡。该位置采空区为长壁式开采采空区,覆岩结构相对稳定。对收集到的数据采用 3σ 方法进行质量控制,以确保数据的准确性,经过整理汇总统计后,划分 37 个基本事件的状态,将采空区路堤边坡故障状态划分为 3 个等级:即每个基本事件均有 3 个基础状态,分别为无故障(记为 0)、中等故障(记为 0.5)和严重故障(记为 1.0),分别用模糊数 0、0.5、1.0 进行描述;若历史记录中描述有不同的状态,则将其划分为多态。根据表 1 中 T-S 门 12 的规则,利用式(5)求得中间事件 C_2 发生不同程度故障的概率分别为:

$$P(C_2 = 0) = \sum_{r=1}^9 P_0^r P^r(C_2 = 0) = P_0^1 P^1(C_2 = 0) + P_0^2 P^2(C_2 = 0) + P_0^4 P^4(C_2 = 0) + P_0^5 P^5(C_2 = 0) = (0.7132, 0.7543)$$
$$P(C_2 = 0.5) = \sum_{r=1}^9 P_0^r P^r(C_2 = 0.5) = P_0^2 P^2(C_2 = 0.5) + P_0^3 P^3(C_2 = 0.5) + P_0^4 P^4(C_2 = 0.5) +$$

$$P_0^5 P^5(C_2 = 0.5) + P_0^6 P^6(C_2 = 0.5) + P_0^7 P^7(C_2 = 0.5) + P_0^8 P^8(C_2 = 0.5) = (0.2453, 0.2186)$$
$$P(C_2 = 1.0) = \sum_{r=1}^9 P_0^r P^r(C_2 = 1.0) = P_0^2 P^2(C_2 = 1.0) + P_0^3 P^3(C_2 = 1.0) + P_0^4 P^4(C_2 = 1.0) + P_0^5 P^5(C_2 = 1.0) + P_0^6 P^6(C_2 = 1.0) + P_0^7 P^7(C_2 = 1.0) + P_0^8 P^8(C_2 = 1.0) = (0.0415, 0.0271)$$

中间事件 C_2 出现无故障的概率大,出现故障程度 0.5 和 1.0 的概率均较小,且出现故障程度为 1.0 的概率小于出现故障程度为 0.5 的概率。利用同样的方法,由下往上逐层计算,求得顶事件 T 发生各故障程度的概率分别为:

$$P(T = 0) = (0.8133, 0.8376),$$
$$P(T = 0.5) = (0.1652, 0.1263),$$
$$P(T = 1.0) = (0.0215, 0.0361)$$

计算结果表明:该采空区路堤边坡出现中等和严重滑塌的概率较低,而不滑塌的概率较大,与文献[14]中的结果一致,说明与该路堤边坡的实际状态非常吻合。为进一步验证所构建 T-S 模糊故障树模型的评价效果,将其与风险矩阵法、一次二阶矩法、蒙特卡罗法、层次分析法、贝叶斯网络法和德尔菲法等常用的边坡风险评估方法进行对比,具体的计算结果见表 2。由表 2 可知:T-S 模糊故障树方法在采空区路堤边坡滑塌可能性评价方面是科学合理的,能够更精细地刻画和反映待评对象的真实状态。

表 2 几种常用方法的采空区边坡滑塌风险评估结果

Table 2 Risk assessment results of goaf area slope collapse using several common methods						
评价结果	风险矩阵法	一次二阶矩法	蒙特卡罗法	层次分析法	贝叶斯网络法	德尔菲法
	低风险	低风险	低风险	低风险	低风险	低风险

根据基本事件的重要度分析确定可能滑塌的关键致险因子,利用式(5),得到各基本事件的各非零故障程度对采空区路堤边坡中度滑塌和严重滑塌的 T-S 概率重要度;再利用式(6),综合各基本事件全部非零故障程度的 T-S 概率重要度,得到各基本事

件分别对采空区路堤边坡中度滑塌和严重滑塌的 T-S 概率重要度。表 3 为对实例采空区路堤边坡中等滑塌和严重滑塌影响较大的 6 个关键致险因子(底事件)的 T-S 概率重要度。

表 3 对采空区路堤边坡滑塌影响较大的基本事件的 T-S 概率重要度

Table 3 T-S probability importance of basic events with significant impact on the goaf embankment slope				
序号	重要基本事件	$I_{T_p=0.5}^{Pr}(x'_i)$	重要基本事件	$I_{T_p=1.0}^{Pr}(x'_i)$
1	不利岩土体 x_3	0.0425	地应力高 x_1	0.0102
2	采空区浅埋 x_8	0.0295	陡峭地形 x_7	0.0068
3	地表水下渗 x_{11}	0.0501	地震 x_{15}	0.0109
4	降雨 x_{20}	0.0378	爆破 x_{25}	0.0085
5	矿山开采 x_{22}	0.0576	采空区处理 x_{29}	0.0121
6	监控预警不及时 x_{35}	0.0615	加固支护 x_{37}	0.0078

由表3可知:当发生中等滑塌事故时, x_{35} 的T-S概率重要度最大,控制好这一因素对于预防中等滑塌的效果最为明显,在工程中应严格按照要求及时
进行监控预警非常重要,同时,可按 x_{22} 、 x_{11} 、 x_3 、 x_{20} 、 x_8 的顺序进行重点故障排查,一旦发现异常指标,立即启动预警机制。当发生严重滑塌事故时, x_{29} 的T-S概率重要度最大,说明处理采空区对预防该事故的效果最为明显,同时可按 x_{15} 、 x_1 、 x_{25} 、 x_{37} 、 x_7 进行重点故障排查。

4 结 论

1) 基于改进 T-S 模糊故障树构建采空区路堤边坡滑塌风险评估模型,拓展了传统故障树分析在

模糊多态系统中的应用边界,精准量化表征滑塌事件的模糊性故障概率和多状态逻辑关系,为复杂地质条件下的风险评估提供一种新的分析框架。

2) 明确了采空区路堤边坡滑塌的关键致险因子及其影响程度排序,克服传统方法在因素多样性与系统可扩展性方面的局限,增强矿区道路工程风险管控的针对性与可操作性。

3) 实例验证结果表明:T-S 概率模型在推理精度与实用性方面表现出良好效果,但尚缺乏实时动态性与具体控制措施,在不同地质与工程条件场景下,模型的节点需作动态调整。未来将融合深度学习等机器学习算法,增强模型在复杂地质环境下的动态诊断与智能决策能力。

参 考 文 献

[1] 解联库,熊代余,杨天鸿,等.露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析及其治理[J].中国有色金属学报,2020,30(10):2 503-2 512.
XIE Lianku, XIONG Daiyu, YANG Tianhong, et al. Analysis on disaster impact of concealed goaves underneath open-pit slope and its treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2 503-2 512.

[2] 董建军,冯晓硕,张莹.外送线路穿越矿权区域地表形变监测与安全稳定性评价[J].中国安全科学学报,2025,35(2):203-211.
DONG Jianjun, FENG Xiaoshuo, ZHANG Ying. Surface deformation monitoring and safety and stability evaluation of electricity transmission line crossing mining rights area[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2): 203-211.

[3] LI Jiamei, ZHANG Chaobo, ZHANG Qiang. et al. Exploring the influence of alfalfa root reinforcement on the loess slopes reliability analysis[J]. Natural Hazards,2025,121(5):6 339-6 356.

[4] MOHAMMAD A, REZA A, NAVID K, et al. Highly efficient reliability analysis of anisotropic heterogeneous slopes: machine learning-aided Monte Carlo method[J]. Acta Geotechnica,2022,18(6):3 367-3 389.

[5] LEI Daxing, ZHANG Yaoping, LU Zhigang, et al. Predicting factor of safety of slope using an improved support vector machine regression model[J]. Mathematics, 2024, 12(20): DOI: 10. 3390/math12203254.

[6] LONG Mingxian, ZHU Hailong, ZHANG Guangling, et al. Aerospace equipment fault diagnosis method based on fuzzy fault tree analysis and interpretable interval belief rule base[J]. Mathematics, 2024, 12(23):2024, 12, DOI: 10. 3390/math12233693.

[7] KOOHATHONGSUMRIT N, CHANKHAM W. Risk analysis of underground tunnel construction with tunnel boring machine by using fault tree analysis and fuzzy analytic hierarchy process [J]. Safety, 2024, 10 (3): 60-68.

[8] 袁凡雨,米琴,陈杰,等.基于事故树分析的重大事故隐患评判方法[J].中国安全科学学报,2025,35(6):37-41.
YUAN Fanyu, MI Qin, CHEN Jie, et al. Evaluation method for major accident hazards based on accident tree analysis[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 37-41.

[9] 钟国强,王洁,孔利,等.基于 T-S 模糊故障树的地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价[J].岩土力学,2019,40(4):1 569-1 576.
ZHONG Guoqiang, WANG Hao, KONG Li, et al. Evaluation of the possibility of foundation pit collapse with "diaphragm wall+ support" based on T-S fuzzy fault tree[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1 569-1 576.

[10] 刘若君,张幼振,姚克.基于 T-S 模糊故障树的煤矿坑道钻机液压动力系统故障诊断研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):194-202.
LIU Ruojun, ZHANG Youzhen, YAO Ke. Fault diagnosis of hydraulic power system for coal mine tunnel drilling rig based on T-S fuzzy fault tree[J]. Coal Geology Exploration,2022,50(12):194-202.

[11] LIU Chun, LI Jinshi, ZHANG Di. Fuzzy fault tree analysis and safety countermeasures for coal mine ground gas transportation system[J]. Processes,2024,12(2): DOI:10. 3390/pr12020344.

[12] SANJIB S, KARTIK P, KUMAR S M. Similarity measure of gaussian fuzzy numbers and its application[J]. International Journal of Applied and Computational Mathematics,2021,7(3):30-48.

[13] ZEINEB S B, MAHER K, MOEZ A, et al. T-S fuzzy fault-tolerant tracking control of a PV pumping system based on an induction motor[J]. IETE Journal of Research,2023,69(7):4 826-4 835.

[14] 杨铎,郭庆彪,万战胜,等. 涪南高速采空区路段覆岩赋存状态与处治对策[J]. 科学技术与工程,2021,21(9): 3 537-3 543.
YANG Feng, GUO Qingbiao, WAN Zhansheng, et al. Overburden conditions and treatment measures of the Mian-Luan expressway goaf section[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(9):3 537-3 543.

作者简介: 赵 博 (1986—),男,山西太原人,博士,副教授,主要从事灾害评价与防治方面的研究。E-mail: zhaobo@ tyut. edu. cn。