DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0407 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-14

基于理想点法-改进突变理论的隧洞坍塌风险评价

毛启勇[1,2],侍克斌[1,2*],李磊[1,2],张建明[1,2],姜海波[1],严新军[1]

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:隧道掘进机(Tunnel Boring Machine ,TBM)施工隧洞坍塌具有复杂性与模糊性,为准确评估坍塌灾害,提出了一种基于理想点法-改进突变理论的坍塌风险评价模型。首先,从工程地质、水文地质、勘察设计与施工四个方面,选取了11评价指标并以此建立风险评价体系;随后,通过理想点法对各指标的重要性进行排序;并确定突变级数中控制变量的取值,逐层递进求得隶属度以及最终隶属度;最后根据隶属度原则得到隧洞坍塌风险等级。利用该方法对新疆KS隧洞穿越断层破碎带进行了评价,与实际情况进行了对比,提出了相应的解决措施,并对其效果进行评估。研究结果表明:该模型评价的结果与现场实际坍塌的结果基本一致,能较好地反映出KS隧洞穿越破碎带地段的实际情况;提出的解决方案应用效果较好,确保了TBM能顺利穿越破碎带。

关键词:理想点法;改进突变理论;坍塌;破碎带

中图分类号:U458 **文献标志码:**A

Risk assessment of tunnel collapse based on ideal point method-improved catastrophe theory

MAO Qiyong[1,2], SHI Kebin[1,2*], LI Lei[1,2], ZHANG Jianming[1,2], JIANG Haibo[1], YAN Xinjun[1]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052;
2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Project Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi, Xinjiang 830052)

Abstract: The collapse of tunnel constructed by tunnel boring machine (TBM) is complex and fuzzy. In order to accurately evaluate the collapse disaster, a collapse risk assessment model based on ideal point method and improved catastrophe theory is proposed. Firstly, from the four aspects of engineering geology, hydrogeology, survey design and construction, 11 evaluation indexes are selected and the risk evaluation system is established. Then, the importance of each index is sorted by the ideal point method. The value of the control variables in the mutation series is determined, and the membership degree and the final membership degree are obtained step by step. Finally, the risk level of tunnel collapse is obtained according to the principle of membership degree. This method is used to evaluate the KS tunnel crossing the fault fracture zone in Xinjiang, and compared with the actual situation. The corresponding solutions are put forward and the effect is evaluated. The results show that the evaluation results of the model are basically consistent with the actual collapse results, which can better

收稿日期:XXXX-XX-XX

作者简介:毛启勇(1998-),男,硕士研究生,主要从事超特长隧洞施工规划及技术研究,E-mail:mqyscszzx@163.com。

通信作者:侍克斌(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事寒冷干旱区水利水电与水工结构研究,E-mail: xndsg@sina.com

基金项目:"新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室"2022年研究项目(ZDSYS-YJS-2022-08)

本文引用格式:毛启勇,侍克斌,李磊,等.基于理想点法-改进突变理论的隧洞坍塌风险评价[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-14.

Citation:MAO Qiyong, SHI Kebin, LI Lei, et al. Risk assessment of tunnel collapse based on ideal point method-improved catastrophe theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-14.

reflect the actual situation of KS tunnel crossing the fracture zone. The application effect of the proposed solution is good, which ensures that TBM can smoothly cross the fracture zone.

Key words: ideal point method; improved catastrophe theory; collapse; fracture zone

引言

应用隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)进行隧洞开挖过程中常会遇到断层破碎带、软弱岩层等不良地质条件,导致突发性的围岩坍塌事故时有发生,极大可能会造成工程非必要的经济损失、工期延误等情况[1-3]。因此对TBM开挖的隧洞坍塌进行及时、准确的评价,是亟需解决的问题。

针对隧洞坍塌风险评价,国内外学者从不同理论角度进行了研究:模糊综合评价法[4]、贝叶斯网络[5]、云模型[6]、可拓理论[7]和D-S证据理论[8]等。尚彦军等[9]通过分析TBM穿越昆明上公山引水隧道围岩失稳造成卡机事故,主要是由于断层破碎带的存在,并以此得出破碎带围岩遭遇TBM时蠕变发生条件和护盾破坏变形机理;Wang[10]等为了有效控制塌方灾害的发生,建立了基于属性合成评价模型的新的隧道塌方动态风险评估方法;刘宁[11]分析了TBM在破碎岩体中进行掘进时,撑靴无法借力导致TBM难以向前掘进,并且围岩难以控制在TBM扩挖的范围之内,提出先导洞方案与其他支护优化设计和应对策略来解决问题;张子新等[12]利用BLKLAB软件分析TBM隧洞开挖对围岩的影响,从而得到了围岩失稳的可动块体和关键块体;赖永标[13]等提出支持向量机对围岩稳定性进行分类研究,并与BP神经网络算法进行比较,结果表明此方法更适用于围岩稳定性分类;吴波[14]等提出一种多数据融合的人工智能变形评估方法,此方法利用人工智能预测围岩变形量作为信息源,得到超前失效概率,并将其运用于金珠帕隧道从而避免了坍塌的发生;王拓[15]通过对TBM开挖围岩过程进行数值模拟与试验分析,基于此提出围岩卸荷主要分为压密、弹性增长、塑性屈服以及破坏四个阶段;宋战平[16]等提出非线性模糊层次分析法,在传统FAHP中引入非线性算子计算,成功运用于TBM穿越F2-2次生断层破碎带的风险评价。

上述研究方法虽从不同角度、不同理论取得了不错的效果,但仍存在一定的局限性。如模糊综合评价法能有效处理评价信息的不确定性与模糊性,适用于多种评价场景,但在处理不同地质条件时可能需要更多的专业知识来确定评价因素和权重,其权重的确定具有较强的主观性,从而影响评价结果的客观性和公正性。此外,模糊综合评价法的评价过程中需要较多的数据和信息,较难在信息缺乏的情况下进行有效评价,在评价因素众多时,可能会出现超模糊现象,分辨率很差,无法区分哪个等级的隶属度更高,甚至造成评判失败。贝叶斯网络可以处理大量变量之间的复杂关系,能够有效地描述变量之间的依赖关系,但在处理变量之间的非线性关系和交互作用时可能较为困难,地质条件往往涉及复杂的非线性关系。同时,该方法需要大量的准确数据来估计参数,这对于数据的准确性要求较高,计算复杂性可能较高,需要使用高效的算法来解决。云模型能够有效处理不确定性信息,适用于地质条件中普遍存在的模糊性和不确定性,但在建立云模型时,其云数字特征参数的确定以及模型的复杂性仍然是需要进一步研究和解决的关键问题。虽然云模型对数据准确性要求不高,但其计算复杂度较高。由于TBM隧洞坍塌具有突发性、复杂性、不确定性等特点,导致难以全方位进行准确评价。突变级数法能够很好的解决此类问题,其是基于突变理论基础上发展起来的一种综合评价方法[17]。变级数法没有对指标采用权重,但它考虑了各评价指标的相对重要性,从而减少了主观性又不失科学性、合理性。其能够综合考虑多种影响因素,实现定性分析和定量计算相结合,适用于不同地质条件的评价,不需要对评价指标进行复杂的权重赋值,因此在数据准确性要求方面具有一定的灵活性。计算过程相对简单,易于理解和掌握,减少了计算过程中可能出现的错误,提高了计算的准确性。能有效的解决多因素作用下隧洞坍塌评价的问题。基于此,本文通过将理想点法与改进突变理论相结合,通过理想点法对评价指标的重要性进行排序后,利用改进突变理论计算最终突变隶属度,从而得到评价风险等级,并将此模型运用于新疆KS隧洞验证其有效性与适用性。

1 研究方法

1.1 理想点法

理想点法是根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法,是在现有的对象中进行相对优劣的评价,用于求解多目标规划问

题[18-19]。目前,理想点法应用于多个领域,包括但不局限于数学和优化领域,多准则决策中。取得了不错的效果,从而证实了理想点法在风险评估领域的科学性和适用性。具体步骤如下:

(1)确定评价体系

假设将隧洞作为评价对象R,假设其评价指标个数为i,隧洞坍塌风险评价n个目标函数,就可构造目标函数:

(1)标准化决策矩阵

正向指标:

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{ij})}} \tag{1}$$

负向指标:

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}^{-1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}^{-1})}} \tag{2}$$

式中:y_{ij}是标准化后的数值,x_{ij}^{-1}为观测值x_{ij}的倒数。

(3)确定最优理想解与最劣理想解

$$Z^{+}=\left\{\max\left(y_{ij}\right)\right\}=\left\{\max y_{i1},\max y_{i2},\max y_{i3},\ldots,\max y_{im}\right\} \tag{3}$$

$$Z^{-}=\left\{\min\left(y_{ij}\right)\right\}=\left\{\min y_{i1},\min y_{i2},\min y_{i3},\ldots,\min y_{im}\right\} \tag{4}$$

式中:Z^{+}, Z^{-}分别为最优值集合和最劣值集合。

(4)计算各方案与理想解和最劣理想解的距离

理想点函数一般采用欧式距离或闵可夫斯基距离进行计算,本文使用欧氏距离,理想点与各评价因子之间的距离:

$$D_j^{+}=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(Z_{ij}^{+}-y_{ij})^2} \tag{5}$$

$$D_j^{-}=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(Z_{ij}^{-}-y_{ij})^2} \tag{6}$$

式中:D_j^{+}, D_j^{-}分别为最优距离和最劣距离。

(5)计算评价对象与最优方案的距离与权重

$$C_j=\frac{D_j^{-}}{D_j^{+}+D_j^{+}} \tag{7}$$

$$w_j=\frac{C_j}{\sum_{i=1}^{m}C_j} \tag{8}$$

式中:C_j, w_j分别为最优距离和权重。

(6)排序

将指标层计算出的权重,由大到小进行排序,从而得到不同指标间的相对重要性,准则层则由指标层的指标权重相加,并排序。

1.2 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient),通常用字母"r"表示,是用于衡量两个变量之间线性相关程度的统计指标[20]。皮尔逊相关系数的取值在[-1,1]之间,当"r"大于0时,取值越大,表明变量之间正相关性越强;当"r"小于0时,取值越小,负相关性越强。但是在解释r的结果时,需要注意其局限性和适用条件。r的计算公式如下:

$$r=\frac{n(\sum xy)-(\sum_{i=1}^{n}x\sum_{i=1}^{n}y)}{\sqrt{(n\sum_{i=1}^{n}x^2-(\sum_{i=1}^{n}x)^2)(n\sum_{i=1}^{n}y^2-(\sum_{i=1}^{n}y)^2)}} \tag{9}$$

式中:n为样本数量;x、y为变量对应的值。

1.3 改进突变理论

1.3.1 突变理论基本原理

突变理论由法国数学家勒内·托姆(Ren Thom)提出,用于解释系统状态非连续变化现象,目前广泛用应用数学和工程领域,可以有效解决数据突变问题、指标评估、数据挖掘和分析等问题[21-23]。常用的突变类型有4种:折迭突变、尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变[24],其基本模型及归一化公式见表1,其中$f(x)$表示目标层的势函数,x表示状态变量,a,b,c,d表示控制变量。

表1 常用几种突变模型类型及归一化公式

Table 1 Several common types of catastrophe models and normalization formulas

突变类型	控制变量	势函数	归一化公式
折迭突变型	1	$f(x)=x^3+ax$	$x_a=a^{1/2}$
尖点突变型	2	$f(x)=x^4+ax^2+bx$	$x_a=a^{1/2},x_b=b^{1/3}$
燕尾突变型	3	$f(x)=x^5+ax^3+bx^2+cx$	$x_a=a^{1/2},x_b=b^{1/3},x_c=c^{1/4}$
蝴蝶突变型	4	$f(x)=x^6+ax^4+bx^3+cx^3+dx$	$x_a=a^{1/2},x_b=b^{1/3},x_c=c^{1/4},x_d=d^{1/5}$

1.3.2 缺陷及改进

由于传统的突变理论存在2个方面的不足[24-25],一方面是指标主观排序的结果会影响其归一化公式的选取,从而影响到总的隶属度值,另一方面是使用归一化公式进行逐层求解,会导致总突变隶属度值不断趋近1,造成判别的评价结果存在优劣性,因此为了克服存在的缺陷,采用理想点法对指标的进行相对重要性进行排序,运用数值变换的方法进行改进,具体步骤如下:按照图2所建立的评价体系,假设指标层的隶属度值均取X_i,求出对应的目标层隶属函数值Y_i,从而构建X_i与Y_i之间的拟合关系式,并运用拟合函数将Y_i转换为对应的X_i,拟合值与拟合函数如表2和图1所示。

表2 拟合函数值

Table 2 Fitting function values

X_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Y_i	0	0.702	0.779	0.828	0.866	0.896	0.922	0.945	0.965	0.983	1

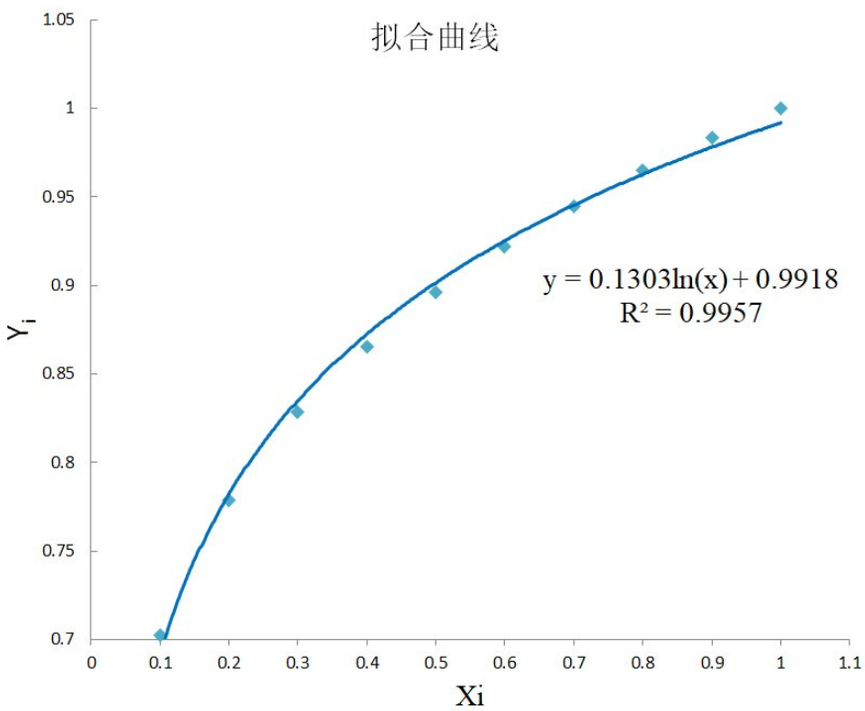


图1 X_i与Y_i拟合函数图

Fig.1 The fitting function diagram of X_i and Y_i

1.3.3 改进突变理论评价

1)构建判别指标体系。按照系统的内在作用机制,建立包括目标层、准则层、指标层的多层次多指标评价体系,通过理想点法对各类指标按重要性依次排序。

2)确定突变级数类型与指标标准化。根据突变理论判断突变级数的原理,从而确定指标层、准则层的突变级数类型,进行无量纲化处理并根据归一化公式求得突变隶属值。指标标准化处理,正向指标采用公式(10)处理,负向指标采用公式(11)处理。

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{10}$$

$$x_i^* = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{11}$$

式中:x_i、x_i^*为评价指标标准化值,$x_{\max}$、$x_{\min}$分别为各指标的最大值和最小值。

3)互补性与非互补性判断。互补性与非互补性的判断有2种判定方法,从主观上来看,同一层次系统的各个控制变量之间不能相互弥补,即失去一个控制变量,将不能完整的描述系统,则为非互补,反之,为互补,从客观进行判断,同一层次系统的各个控制变量之间相关系数(皮尔逊相关系数、肯德尔相关系数等)大于某一个值时为互补(本文选取0.5),反之为非互补。同时需遵循以下原则:判断指标之间为“互补”,则需取各个控制变量对应值的平

均值,指标之间为“非互补”,则需对各个控制变量对应值按照“大中取小”的原则进行取值。

4)计算风险等级。根据步骤上述步骤求得指标层的隶属度值,然后按照互补或者非互补原则求得各准则层的隶属度值,从而逐层向上求解,最终求得目标层的隶属度值,并将其代入拟合函数,求得拟合后的隶属度值,判断其隶属于改进后的评价区间的等级,最终得到风险评价的等级。

2 坍塌风险评价指标选取与等级建立

2.1 选取评价指标

引起TBM隧洞坍塌的因素是复杂的,本文通过查阅大量与TBM隧洞坍塌相关的资料,并参考国内外学者相关的研究[26-29],总结出TBM隧洞坍塌主要是由工程地质、水文地质、设计施工因素引起的。因此将影响TBM隧道坍塌的因素划分为上述的四大类,并对四类因素进行分解后共涵盖了11个二级因素:

地质因素:①岩石单轴饱和抗压强度(A_1)反应隧道围岩的软硬程度,一般情况下,抗压强度越大,发生坍塌的可能性越低。②岩石完整性系数(A_2)反映构成隧洞的岩块大小及完整程度,反映岩石的强度、韧性、破裂特性等。③软化系数(A_3)反映了岩石在经历了初始破坏后,其强度降低的程度。④结构面倾角(A_4)反映了岩体内部的裂隙、层理或其他结构面的方向和稳定性。

水文因素:①地下水渗水量(B_1),渗水量的大小与土壤或岩石的孔隙结构和渗透性密切相关,渗透性越高,渗水量越大,渗水量越大发生坍塌的可能性越高。②含水层透水性(B_2)反映了地下水在含水层中流动的能力。

设计因素:①破碎带宽度(C_1)反映了岩体在地质作用下的破碎程度和结构特征,破碎带的宽度越大,通常意味着岩体的强度越低,稳定性可能越差,容易发生坍塌。②隧洞埋深(C_2),隧洞埋深越深,发生坍塌可能性越低。③地质勘察准确性(C_3),岩石质量指标RQD设计值与实际揭露RQD实测值之比表示,比值越接近于1,表示地质勘察越准确,隧洞坍塌的风险越低。

施工因素:①施工技术水平(D_1),施工技术水平是指超前支护措施(管棚法、小导管法、注浆法及超前锚杆等)设计是否合理、开挖进尺是否恰当、支护背后是否存在空洞、TBM对围岩的扰动量是否过大等施工技术因素。②施工管理水平(D_2)施工管理水平是指防排水措施是否合理、初期支护是否合理、超前地质预报开展是否合理、监控量测开展是否合理与现场情况反馈是否及时等组织管理因素。最终的指标选取结果如图2所示。此外,本文对“施工技术水平”、“施工管理水平”进行量化赋分:每小项满分5分,共计20分。

本文将图2中的目标层定义为TBM隧洞坍塌风险评价的总指标,基于1.3节,准则层为蝴蝶突变型,指标层则分别为蝴蝶突变型、尖点突变型、燕尾突变型、尖点突变型。

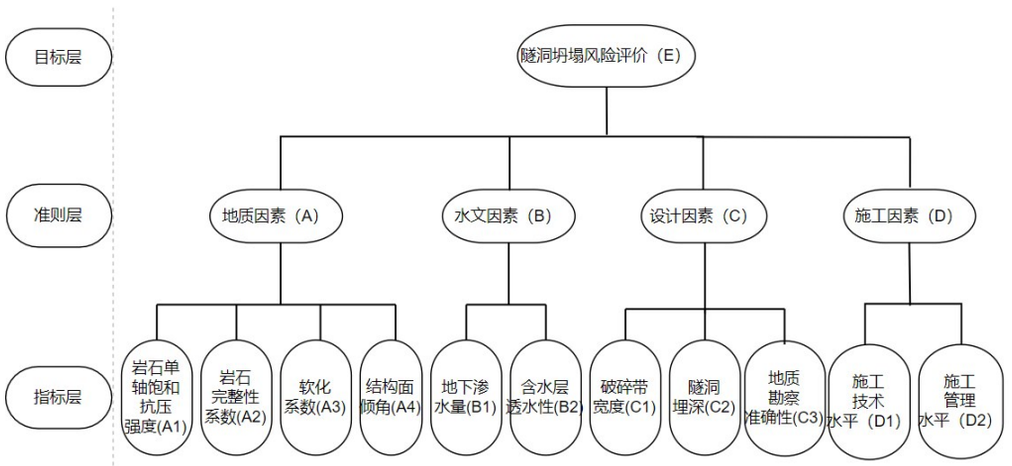


图2 隧洞坍塌评价风险体系

Fig.2 Tunnel collapse evaluation risk system

2.2 评价分级标准的制定

进行隧洞坍塌风险评价时,需明确各评价指标的在不同风险等级的评价标准,为确保风险等级分级划分的合理性,参考国内外学者[26-29]风险等级的

划分标准的因子等级划分,本文将各指标的评价区间均标准化为[0-1]之间的值。首先利用表1中的归一化公式对其进行处理,由此得到突变级数法评价区间。再通过图1表示的拟合函数进行计算,最终得到了改进后的突变级数法评价标准,共分为四个等级,等级划分结果见表3。

表3 隧道坍塌风险综合评价等级标准

Table 3 Comprehensive evaluation grade standard of tunnel collapse risk

等级	V1低度风险	V2中度风险	V3高度风险	V4极度风险
标准区间	1～0.8933	0.8933～0.8354	0.8354～0.7630	0.7630～0
改进区间	1～0.4696	0.4696～0.3011	0.3011～0.1727	0.1727～0
X_1	＞100	50～100	10～50	0～10
X_2	0.75～1	0.5～0.75	0.2～0.5	0～0.2
X_3	0.6～1	0.45～0.6	0.4～0.45	0～0.4
X_4	30～90	10～30	5～10	0～5
X_5	0～10	10～25	25～125	125～300
X_6	＜0.01	[0.01～1.0)	[1.0～10)	≥10
X_7	＞40	20～40	10～20	0～10
X_8	[80%,100%)	[70%,80%)	[50%,70%)	＜50%
X_9	0～5	5～10	10～20	＞20
X_{10}	好[16－20]	一般[11－15]	差[6－10]	很差(0,5]
X_{11}	好[16－20]	一般[11－15]	差[6－10]	很差(0,5]

X_1(岩石单轴饱和抗压强度)Mpa、X_2(岩石完整性系数)、X_3(软化系数)、$X4$(结构面倾角)°、X_5(地下水渗水量)(L·(min·10m)-1)、X_6含水层透水性/m•d^{-1}、X_7破碎带宽度/m、X_8(隧洞埋深)m、、X_9地质勘察准确度、X_{10}施工技术水平、X_{11}施工管理水平。

参考国家相关标准[30]对隧洞坍塌不同等级对应的坍塌风险可描述为:

低度风险:小范围内出现轻微塌陷,如局部岩石破碎或沉降,通常不影响结构的完整性。可见微小裂缝、位移,土体或岩石有少量掉落,坍塌处可能存在0.1～0.3米空腔。

中度风险:隧洞出现小规模的岩石掉块、泥渣,可能导致一定的施工影响,但隧洞结构仍然稳定。出现明显的裂缝及局部边坡崩塌,土体或岩石掉落量增大,坍塌处可能存在0.3～1米空腔。

高度风险:大面积的坍塌,可能对隧洞结构产生威胁,导致部分结构失稳或可用空间被严重影响。强烈的裂缝生成,隧洞顶部部分或两侧岩体大幅崩塌,可能影响设备和作业人员安全,坍塌处可能存在1～2米空腔。

极度风险:隧洞结构受到重大破坏,施工无法继续,大面积岩体塌落造成TBM卡机,可能造成设备损坏和人员伤亡,坍塌处可能存在大于2米空腔。

2.3 风险评估流程

本文的风险评估流程为:首先通过收集工程实测数据与专家调查法数据,并根据不同类型的影响因子建立评价体系。然后利用理想点法对指标进行排序,确定各指标的控制变量取值,采用突变级数法确定评价对象的隶属值,最终确定风险等级。最后对不同风险等级采取对应的处置方案,减少不必要的损失。具体的TBM穿越断层破碎带的评价流程图(如图3)。

3 工程应用

3.1 研究区概况

新疆某KS隧洞段Ⅸ标地势总体北高南低、东高西低,由北东向南西缓慢倾斜,采用一台直径为7 m的TBM进行掘进,隧洞沿线分别发育有低矮的小山丘、山丘一般高30～40m,最大可达50～80m,冲沟较发育,但无常年流水的河流发育。本文选取KS隧KS259＋500～KS261＋500段进行研究,区域内气候干燥、降水量稀少、多风,蒸发量远大于降水量,施工中洞壁主要为渗水、滴水现象,局部断层破碎带会有线状流水。地层岩性主要为:片理化凝灰岩、凝灰角砾岩。该洞段共5条次级断层(f73～f80),产状为275°～320°NE∠75°～ 80°或55° NW∠70°,,断层走向与洞线方向夹角30～75°,破碎带宽度多为20～32m,断层带内以糜棱岩、碎裂岩为主,岩体稳定性差。其中发育有4条小断层,宽度一般1.5～2.5m,带内以糜棱岩、碎裂岩为主,对应洞段的地质剖面图(如图4)。

根据KS隧洞勘察设计资料与专家评分法获得的数据如表4。通过皮尔逊相关系数法对指标层的相关性进行计算,并按照1.3.3节提出的判断原则进行判断,相关系数热力图如4。由此可知图2中各指标间的关系,A_1、A_2、A_3、A_4为互补关系,B_1、B_2为互补关系,C_1、C_2、C_3为互补关系。D_1与D_2为问卷数据且控制变量之间不能相互弥补,判断为非互补关系。A与B、C、D控制变量之间不能相互弥补,判断为非互补关系。

3.2 结果验证

首先按公式(1)、(2)对表4中的数据标准化,之后使用公式(3)、(4)计算出最优、最劣理想解,利用公式(5)、(6)计算各指标的欧式距离,其次由公式(7)、(8)计算最优距离与权重,最后将其从大到小进行排序,根据排序的大小选择控制变量,准则层各指标的权重则由各指标层进行相加得到,并按照

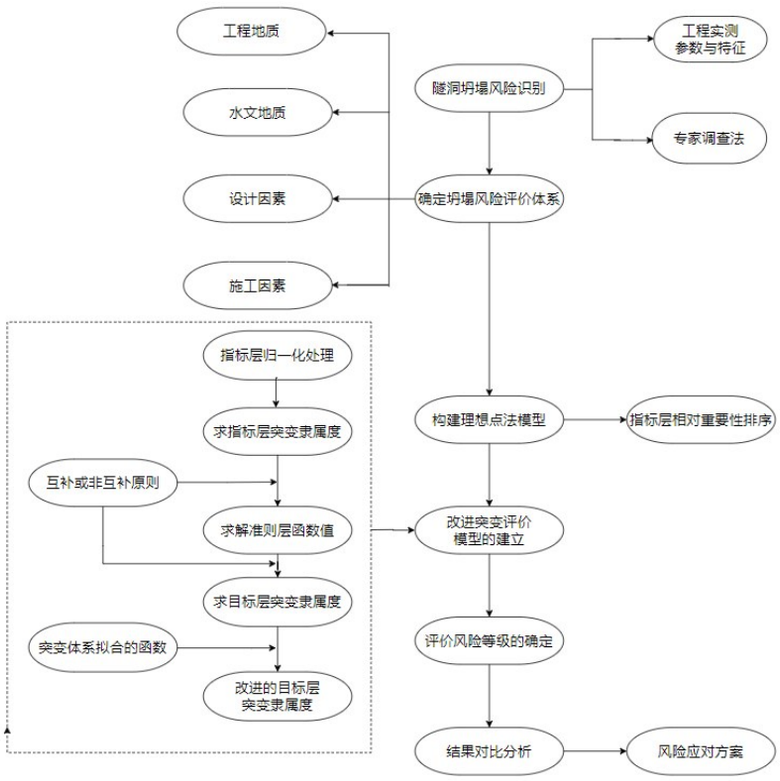


图3　隧洞坍塌风险评价流程图

Fig. 3　Flow chart of tunnel collapse risk assessment

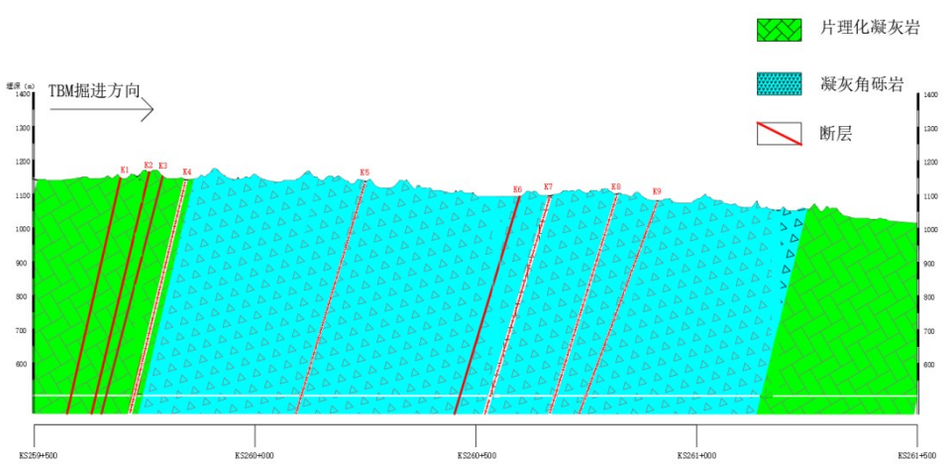


图4　KS259+500~KS261+500段地质剖面图

Fig.4　Geological section of KS259 + 500 ~ KS261 + 500

升序原则进行排序,从而确定准则层控制变量的选取,指标排序结果见表5。

通过改进的突变理论对表4进行计算,利用公式(10)、(11)对表4数据进行标准化处理,采用表1中归一化公式进行逐层计算,求得目标层E的总突变隶属度为止,并将求得的E通过图1中的拟合函数进行转换,以此类推从而求得各样本的总突变级数值(如表6)。

根据表6中转换隶属度值,由表3可知,K1、K2、K3、K6坍塌风险等级为V1(低风险),K5、K8、K9坍塌风险等级为V3(高风险),K4、K7坍塌风险为V4(极高风险),同时为验证模型评价结果的可靠性,采用模糊综合评价法与本文模型进行对比分析,并与工程实际掘进过程中发生坍塌等级进行对比,见表7。结果表明:两种评价方法得到隧洞坍塌风险等级基本符合,并与工程实际坍塌情况相符。

TBM隧洞坍塌不同等级实际情况描述如下:

在TBM掘进过程中,穿越K2、K3和K6断层破

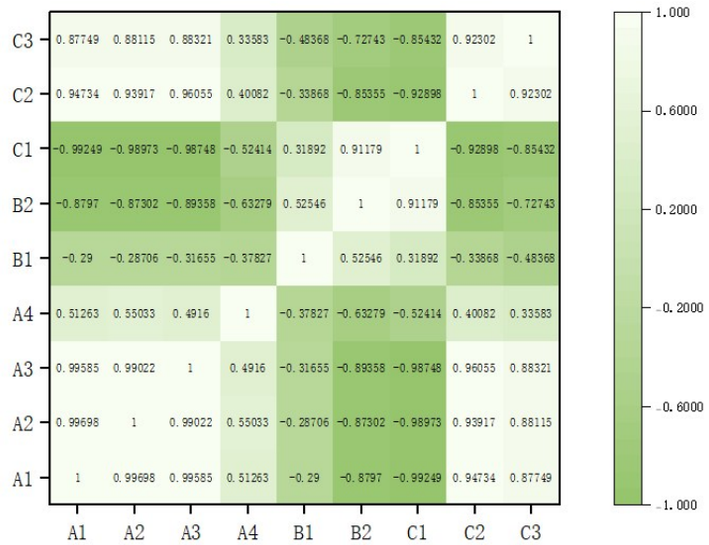


图5 评价因子相关系数图

Fig.5 Correlation coefficient of evaluation factors

表4 工程实例数据

Table 4 Engineering example data

		地质因素				水文因素		设计因素			施工因素	
隧洞段	区域桩号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
K1	KS259+575～KS259+600	78	0.75	0.58	65	5	0.02	2.4	540	0.94	13	13
K2	KS259+620～KS259+640	80	0.78	0.6	62	7	0.03	2	552	0.95	14	13
K3	KS259+650～KS259+680	82	0.8	0.62	60	1	0.06	1.5	580	0.98	13	13
K4	KS259+730～KS259+765	45	0.38	0.35	65	4	0.6	30	520	0.92	11	11
K5	KS260+105～KS260+140	54	0.46	0.43	55	5	0.3	20	535	0.93	12	12
K6	KS260+455～KS260+485	85	0.82	0.65	61	7	0.08	1.6	565	0.96	13	14
K7	KS260+500～KS260+585	43	0.35	0.32	52	10	1.2	32	515	0.92	12	12
K8	KS260+605～KS260+690	52	0.45	0.42	55	6	0.7	25	565	0.93	13	12
K9	KS260+735～KS260+805	58	0.48	0.45	53	5	0.5	20	532	0.93	12	12

X_1(岩石单轴饱和抗压强度)Mpa、X_2(岩石完整性系数)、X_3(软化系数)、$X4$(结构面倾角)°、X_5(地下水渗水量)(L·(min·10m)$^{-1}$)、X_6含水层透水性/m•d^{-1}、X_7破碎带宽度/m、X_8(隧洞埋深)m、、X_9地质勘察准确度、X_{10}施工技术水平、X_{11}施工管理水平。

表5 评价指标排序

Table 5 Evaluation index ranking

目标层	准则层	权重	排序	控制变量	指标层	权重	排序	控制变量
隧洞坍塌风险等级	地质因素	0.3257	1	*a*	X_1	0.0821	2	*b*
					X_2	0.0823	1	*a*
					X_3	0.0803	4	*d*
					X_4	0.0810	3	*c*
	水文因素	0.2262	3	*c*	X_5	0.1177	1	*a*
					X_6	0.1085	2	*b*
	设计因素	0.2833	2	*b*	X_7	0.0946	2	*b*
					X_8	0.0871	3	*c*
					X_9	0.1016	1	*a*
	施工因素	0.1648	4	*d*	X_{10}	0.0800	2	*b*
					X_{11}	0.0847	1	*a*

碎带时,坍塌风险等级为低(V1)。具体来说,在穿越K2段时,拱顶中部存在裂隙发育,形成纵向长度为4.0m、环向宽度为1.5m、深度介于0.2m至0.3m之间的塌腔;在K3段,拱顶部位裂隙较为发育,形成纵向长度为3.0m、环向宽度为2.5m、深度介于0.1m至0.3m之间的塌腔;而在K6段,拱顶右侧存在发育三组相互切割的节理,形成纵向长度为4.0m、环向宽度为1.0m、最大深度为0.3m的塌腔。

在TBM掘进过程中,穿越K1断层破碎带时,坍塌风险等级为中度风险(V2)。

具体来说,在穿越K1段时,拱顶右侧存在多组节理相互切割,围岩受到TBM扰动,形成纵向长度4.2m,环向宽度1.1m,最大深度0.5m塌腔。

在TBM穿越K5、K8和K9断层破碎带时,坍塌风险等级为高度风险(V3)。具体而言,在穿越K5

表6 总突变级数函数值

Table 6 Total catastrophe progression function value

样本	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
隶属度	0.9294	0.9420	0.9603	0.3981	0.8093	0.9398	0.2806	0.7970	0.8051
转换隶属度值	0.6195	0.6822	0.7851	0.0105	0.2464	0.6710	0.0043	0.2242	0.2385

表7 隧洞坍塌等级结果评价

Table 7 Evaluation of tunnel collapse grade results

样本	理想点－改进突变级数法	模糊综合评价法[31]	实际等级
KS258＋765～KS258＋788	V1	V1	V2
KS258＋880～KS258＋890	V1	V1	V1
KS258＋895～KS258＋910	V1	V1	V1
KS259＋010～KS259＋060	V4	V4	V4
KS260＋115～KS260＋142	V3	V3	V3
KS260＋985～KS260＋995	V1	V1	V1
KS261＋305～KS261＋345	V4	V4	V4
KS261＋595～KS258＋640	V3	V4	V3
KS261＋875～KS261＋905	V3	V3	V3

段时,拱顶左侧存在两组发育节理相互切割,围岩受到TBM的扰动,形成纵向长度为3.3m、环向宽度为2.2m、最大深度为1.4m的塌腔;在K8段,拱顶右侧存在一组发育节理,围岩同样受到TBM扰动,形成纵向长度为3.5m、环向宽度为3.3m、最大深度为1.2m的塌腔;而在K9段,拱顶左侧存在两组发育节理,形成纵向长度为3.3m、环向宽度为2.2m、最大深度为1.5m的塌腔。

在TBM穿越K4和K7断层破碎带时,坍塌风险等级为极度风险(V4)。在穿越K4段时,拱顶右侧存在发育节理裂隙相互切割的现象,形成纵向长度为5.5m、环向宽度为2.5m、最大深度为2.5m的塌腔;在K7段,拱顶右侧存在发育多组相互切割的节理,形成纵向长度为4.6m、环向宽度为4.0m、最大深度为3.0m的塌腔。

3.3 风险控制方案

利用理想点-改进突变理论对TBM穿越断层破碎带进行评价时,当评价的风险结果过高,就需要调整原有的支护设计,如果发生不同规模的坍塌,就需针对其采用对应的支护措施及监控测量等施工组织设计方案,确保TBM顺利通过断层破碎带,降低坍塌发生造成的经济损失,具体风险应对方案如下:

(1)当评价结果处于低风险时,只需正常施工,按照设计要求进行支护。KS1、KS2、KS3、KS6风险等级评价结果为低风险与实际情况相符合,TBM无须停机,按照设计要求进行钢拱架、钢筋排、锚杆、网片及连接筋相结合进行支护,并初喷封闭。

(2)当评价结果为中度风险时,掘进过程可能会出现小规模的岩石掉块、空腔等。遇此类情况,TBM无须停机,底部渣块由人工装填到平板车运出。掉块较大时,先将其破碎,再用平板车送出。上部平台清渣,利用吊桶(尺寸:70cm*70cm*80cm)人工装填后,用折臂吊机运送至隧洞底部后,再由平板车送出,清理完毕后,在塌腔处增加钢筋排、网片等并喷射混凝土。

(3)当评价结果为高度风险时,掘进过程中可能会出现顶部与撑靴位置大范围掉块、掌子面下部的围岩较软弱且破碎等情况,KS5、KS8、KS9风险等级评价结果为高风险与实际情况相符合。针对顶部大范围掉块,应进行超前大管棚注浆加固,等掘进出护盾后,立即采用钢拱架、锚杆、钢筋排、网片、并喷射混凝土形成联合支护体系。针对撑靴位置存在大范围掉块,导致撑靴无法接力,可采用以下方法解决:①减小撑靴压力,慢速掘进通过;②撑靴(外弧长4.74m,宽1.55m)处加垫方木,方木的长度视现场实际情况决定,然后慢速掘进通过;③将该部位掉块及渣块清除,然后回填C25混凝土,在其中加入早强剂,等强度达到10MPa后需缓慢掘进通过。掌子面下部围岩较软弱且破碎时,刀盘会存在“载头”的风险,这时应即刻后退刀盘至安全地带,再采取以下方式进行处理:将破碎处围岩清除并适当扩挖,然后浇筑加入早强剂的C25混凝土,待其强度达到15MPa后,转动刀盘向前慢速掘进通过。

(4)当评价结果为极度风险时,可能会出现较

大规模及大规模岩石塌落或空腔,KS4、KS7风险等级评价结果为高风险与实际情况相符合。遇此类情况,掘进机需停机处理,首先人工清理塌落体,然后安装钢拱架,即采用I16工字钢对拱架间进行连接,同时拱脚处锁脚锚杆需加密,在坍塌处及拱部120°铺设钢筋网(φ8mm,@=150×150mm)及钢筋排。为预防空腔内的围岩再次坍塌,对危岩使用型钢进行支撑加固,当钢拱架上落下型钢时,立即使用应急干喷机对坍塌处喷射混凝土,达到封闭的效果,并对围岩形成完整的支护系统,以此减少了岩石暴露时间,此外,为减少后续变形,利用应急干喷机对支护系统钢支撑应进行封闭回填处理。为保证对塌腔内的回填密实,可在拱架背后铺设1mm厚铁皮封闭坍腔,同时从浅到深埋设φ50mm注浆管,梅花形布置,然后再利用手喷系统封闭整个支护面,至拱架全覆盖,初支护达到一定强度后进行注浆回填密实坍腔,同时复喷砼至设计厚度。

3.4 方案效果评估

对不同风险等级发生的坍塌,按照上述方案处理后,并结合TBM施工工程实际情况在其断面处设置A、B、C、D四个监测点对围岩稳定性进行监测(如图6)。参考《水利水电工程锚喷支护技术规范》等相关规范[32-33]并结合工程实际情况,设置TBM施工段沉降变形预警值14.0mm。针对不同等级坍塌处理后的断面,由于篇幅有限,选取每个风险等级处置方案中观察断面累积变形量最大的进行分析,由图7可知,在一个多月的监测中,断面累积变形量在允许范围内,并且断面变形逐渐趋于稳定。因此对于TBM隧洞发生不同风险等级,坍塌的处理方案是有效的,能够确保围岩整体的稳定性和安全性。

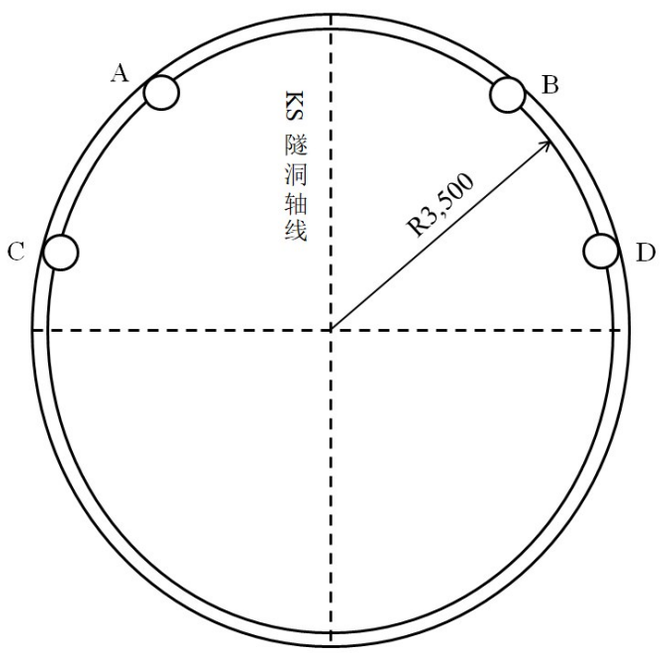


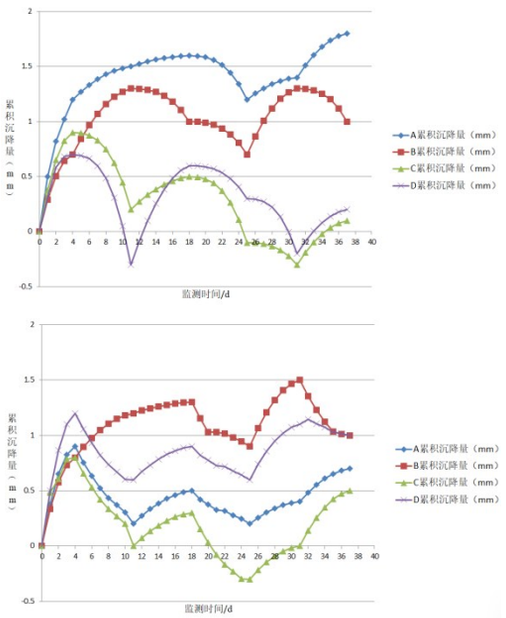
图6 监测点位布置图

Fig.6 Monitoring point layout

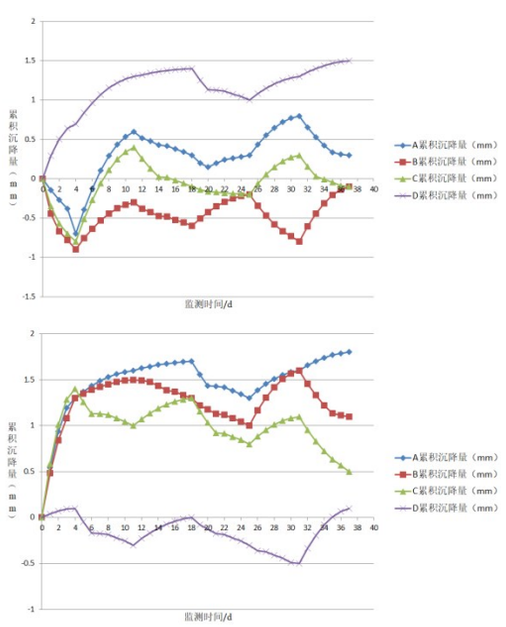
4 结论

(1)本文引入理想点法对TBM施工隧洞坍塌风险评价体系各指标的重要性进行了排序,以此减少了主观影响,使得各指标权重更加科学合理。在此基础上,提出了基于理想点-改进突变级数法的隧洞坍塌风险评价模型,有效解决了传统突变理论评价准确率低的问题。因此,通过理想点法与改进突变理论结合,可较好地解决隧洞坍塌风险等级评价存在的不确性、复杂性难题。

(2)将建立的理想点-改进突变理论模型应用于新疆KS隧洞TBM穿越断层破碎带坍塌洞段,同时与传统的模糊综合评价进行对比,并对TBM穿越断层破碎时,现场发生坍塌实际情况进行了详细的描述,与本文提出的模型评价结果符合。验证了该模型的有效性、适用性。同时,按照不同风险等级结合工程现场坍塌发生情况,提出了相对应的处置方案,取得了不错的效果,确保了TBM顺利穿越断



(a)低风险处理断面监测点位移随时间变化曲线(b)中度风险处理断面监测点位移随时间变化曲线



(c)高度风险处理断面监测点位移随时间变化曲线(d)极度风险处理断面监测点位移随时间变化曲线

图7　不同风险处理断面监测点沉降量变化曲线图

Fig.7　Change curve of settlement at monitoring points of different risk treatment sections

层破碎带,也可为后续类似的TBM施工隧洞坍塌风险研究提供一定的参考。

(3)引起TBM施工隧洞坍塌风险的因素复杂,因此后续的研究中需加入更多的因素对其进行综合分析。

参考文献:

[1] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,(01):13-20.
HUANG Hongwei. State-of-the-Art of the Research on Risk Management in Construction of Tunnel and Underground Works [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2006, (01): 13-20.

[2] 邓朝辉,姚捷,方星桦,等.敞开式TBM施工隧道围岩塌方研究进展[J].人民黄河,2021,43(S1):247-250+254.
DENG Chaohui, YAO Jie, FANG Xinghua, et al. Research progress on surrounding rock collapse of open TBM construction tunnel [J]. People's Yellow River,

2021, 43(S1): 247-250 + 254.

[3] 洪开荣.超长深埋高地应力TBM隧道修建关键技术[J].铁道学报,2022,44(03):1-23.
HONG Kairong. Key Technology for Construction of Ultra-long and Deep-buried TBM Tunnels with High Geostress [J].Railway Journal, 2022,44(03): 1-23.

[4] 张晨曦, 吴顺川, 吴金.山岭隧道施工中塌方风险评估模型研究及应用[J].中国安全生产科学技术, 2019,15(09):128-134.
ZHANG Chenxi, WU Shunchuan, WU Jin. Study on risk assessment model of collapse during construction of mountain tunnel and its application [J]. China Work Safety Science and Technology, 2019,15(09):128-134.

[5] 陈伟先,欧孝夺,吴昱芳,等.基于灰色模糊贝叶斯网络的隧道坍塌风险评估方法[J].桂林理工大学学报,2022,42(03):642-648.
CHEN Weixian, OU Xiaoduo, WU Yufang, et al. Risk assessment method of tunnel collapse based on grey fuzzy Bayesian network [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2022,42(03): 642-648.

[6] 杨光,刘敦文,褚夫蛟,等.基于云模型的隧道塌方风险等级评价[J].中国安全生产科学技术,2015,11(06):95-101.
YANG Guang, LIU Dunwen, CHU Fujiao, et al. Evaluation on risk grade of tunnel collapse based on cloud model [J]. China Safety Production Science and Technology, 2015,11(06): 95-101.

[7] 关晓吉.基于可拓联系云模型的隧道塌方风险等级评价方法[J].中国安全生产科学技术,2018,14(11):186-192.
GUAN Xiaoji. Evaluation method on risk grade of tunnel collapse based on extension connection cloud model [J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14(11): 186-192.

[8] 丘伟兴,赵炼恒,吴波,等.基于证据推理的隧道坍塌多源信息融合评估[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(01):190-200.
QIU Weixing, ZHAO Lianheng, WU Bo, et al. A multi-source information fusion assessment for the tunneling collapse disaster based on evidential reasoning [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2024,51(01): 190-200.

[9] 尚彦军,史永跃,曾庆利,等.昆明上公山隧道复杂地质条件下TBM卡机及护盾变形问题分析和对策[J].岩石力学与工程学报, 2005(21): 60-65.
SHANG Yanjun, SHI Yongyue, ZENG Qingliet al. Analysis and countermeasures of TBM jamming and shield deformation under complex geological conditions in Kun ming Shang gong shan Tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(21): 60-65.

[10] WANG Sheng, LI Liping, SHI Shaoshuai, et al. Dynamic risk assessment method of collapse in mountain tunnels and application[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020,38(2) (prepublish):1-14.

[11] 刘宁,张春生,褚卫江,等.深埋破碎岩体TBM掘进风险评估与应对[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3348-3355.
LIU Ning, ZHANG Chunsheng, CHU Weijiang, et al. Risk assessment and response of TBM tunneling in deep broken rock mass [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(S1): 3348-3355.

[12] 张子新,王帅峰,黄昕.节理岩体中TBM掘进施工围岩稳定性及可视化分析[J].现代隧道技术, 2018, 55(2): 36-43+ 64.
ZHANG Zixin, WANG Shuaifeng, HUANG Xin. Stability and visualization analysis of surrounding rock during TBM tunneling in jointed rock mass [J].Modern tunnel technology, 2018, 55(2): 36-43, 64.

[13] 赖永标,乔春生,刘开云,等.支持向量机在围岩稳定性分类中的应用[J].水利学报,2006,(09):1092-1096.
LAI Yongbiao, QIAO Chunsheng, LIU Kaiyun, et al. Application of support vector machine in classification of surrounding rock stability [J]. Journal of Water Resources, 2006, (09): 1092-1096.

[14] 吴波,丘伟兴,徐世祥,等.基于人工智能变形预测隧道坍塌失效概率评估方法[J].地球科学,2024,49(11):4204-4215.
WU Bo, QIU Weixing, XU Shixiang, et al. A method for evaluating the probability of tunnel collapse failure based on artificial intelligence deformation prediction [J]. Earth Science, 2024,49(11): 4204-4215.

[15] 王拓.西藏多雄拉隧道双护盾TBM掘进与围岩相互作用机理研究[D].成都:西南交通大学, 2018.
WANG Tuo. Study on the interaction mechanism between double-shield TBM tunneling and surrounding rock of Duoxiongla Tunnel in Tibet [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[16] 宋战平,郭德赛,徐甜,等.基于非线性模糊层次分析法的TBM施工风险评价模型研究[J].岩土力学,2021,42(05):1424-1433.
SONG Zhanping, GUO Desai, XU Tian, et al. Research on TBM construction risk assessment model based on nonlinear fuzzy analytic hierarchy process [J]. Geotechnical mechanics, 2021,42(05): 1424-1433.

[17] 黄奕龙.突变级数法在水资源持续利用评价中的应用[J].干旱环境监测,2001,15(3):167-170.
HUANG Yilong. The Application of Catastrophe Progression Method in the Assessment of Sustainable Utili-

zation of Water Resources [J]. Arid Environment Monitoring, 2001,15(3):167-170.

[18] 刘晗,李明超,沈扬,等.混凝土坝长期运行安全的理想点法评价模型[J].水利水电科技进展,2019,39(01):70-75+81.
LIU Han, LI Mingchao, SHEN Yang, et al. Ideal point method evaluation model for long-term operation safety of concrete dams[J]. Technological progress of water conservancy and hydropower, 2019, 39(01): 70-75 + 81.

[19] 徐琛,刘晓丽,王恩志,等.基于组合权重-理想点法的应变型岩爆五因素预测分级[J].岩土工程学报,2017,39(12):2245-2252.
XU Chen, LIU Xiaoli, WANG Enzhi, et al. Five-factor prediction classification of strain-type rockburst based on combined weight-ideal point method [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017,39(12): 2245-2252.

[20] 徐鸿勋,李昱,肖兴涛,等.基于灰色关联度-突变理论模型的黑龙江上游凌汛灾害风险评价[J].中国农村水利水电,2024,(06):105-113+123.
XU Hongxun, LI Yu, XIAO Xingtao, et al. Risk assessment of ice flood disaster in the upper reaches of Heilongjiang Province based on grey correlation-catastrophe theory model [J].China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2024, (06): 105-113 + 123.

[21] 侯广辉,廖桂铭,王刚.基于突变级数的颠覆性技术识别模型构建及实证研究[J].情报杂志,2021,40(10):7-14.
HOU Guanghui, LIAO Guiming, WANG Gang. Construction and empirical research of disruptive technology identification model based on catastrophe progression [J]. Intelligence Journal, 2021, 40(10): 7-14.

[22] 耿婷婷,刘金巍,宋绵,等.基于突变理论的土地质量地球化学评价方法研究[J].农业机械学报,2024,55(08):374-381.
GENG Tingting, LIU Jinwei, SONG Mian, et al. Geochemical evaluation of land quality based on catastrophe theory [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2024,55(08): 374-381.

[23] 周燕华.突变理论[M].北京:高等教育出版社,1990.
ZHOU Yanhua. Catastrophe Theory [M]. Beijing : Higher Education Press, 1990.

[24] 唐明,邵东国,姚成林,等.改进的突变评价法在旱灾风险评价中的应用[J].水利学报,2009,40(07):858-862+869.
TANG Ming, SHAO Dongguo, YAO Chenglin, et al. Application of improved catastrophe evaluation method in drought risk assessment [J]. Journal of Water Resources, 2009,40(07): 858-862 + 869.

[25] 武鑫,赵浩然,郑秀清,等.基于改进突变理论的滑坡稳定性分级判别[J].自然灾害学报,2019,28(04):122-130.
WU Xin, ZHAO Haoran, ZHENG Xiuqing, et al. Classification of landslide stability based on improved catastrophe theory [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(04): 122-130.

[26] 杨光,刘敦文,褚夫蛟,等.基于云模型的隧道塌方风险等级评价[J].中国安全生产科学技术,2015,11(06):95-101.
YANG Guang, LIU Dunwen, CHU Fujiao, et al. Risk grade evaluation of tunnel collapse based on cloud model [J]. China Safety Production Science and Technology, 2015,11(06): 95-101.

[27] 陈舞,孙海清,王浩,等.山岭隧道坍塌风险评价的熵权-集对分析模型及工程应用[J].工程科学与技术,2023,55(05):129-140.
CHEN Wu, SUN Haiqing, WANG Hao, et al. Entropy weight-set pair analysis model for collapse risk assessment of mountain tunnel and its engineering application [J]. Engineering Science and Technology, 2023, 55(05): 129-140.

[28] 王欣.超长隧洞TBM智能掘进及围岩安全评价研究[D].新疆农业大学,2021.
WANG Xin. Research on TBM intelligent tunneling and surrounding rock safety evaluation of super-long tunnel [D].Xinjiang Agricultural University, 2021.

[29] LI li, NI bo, ZHANG Shixin, et al. Tunnel collapse risk assessment based on improved quantitative theory III and EW-AHP coupling weight [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 16054-16054.

[30] 中国建筑业协会.T/CCIAT 0030-2020 水工隧洞TBM掘进施工技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
China Construction Industry Association. T/CCIAT 0030-2020 Technical Specification for TBM Tunneling Construction of Hydraulic Tunnel [S]. Beijing : China Construction Industry Press, 2020.

[31] 刘建华,吴超,张成,等.井壁坍塌风险的模糊综合评价方法[J].石油钻采工艺,2012,34(05):53-56+60.
LIU Jianhua, WU Chao, ZHANG Cheng, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of wellbore collapse risk [J]. Oil drilling process, 2012, 34(05): 53-56 + 60.

[32] 中华人民共和国水利部.SL 377-2007 水利水电工程锚喷支护技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
Ministry of Water Resources of the People′s Republic

of China. SL 377-2007 Technical Specifications for Bolting and Shotcrete Support of Water Conservancy and Hydropower Projects [S]. Beijing : China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2007.

[33] 中华人民共和国水利部. SL/T 52-2015 水利水电工程施工测量规范[S].北京:中国水利水电出版社,2015.

Ministry of Water Resources of the People ′s Republic of China. SL/T 52-2015 Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Measurement Specification [S]. Beijing : China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015.