

基于突变理论的偏压浅埋公路隧道施工风险评价

褚羿超, 彭亚雄, 庞 誉

湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年11月23日; 录用日期: 2024年12月18日; 发布日期: 2024年12月25日

摘 要

利用突变理论来减少偏压浅埋公路隧道在施工中风险事故发生的频率, 提出了突变级数法, 运用于偏压浅埋公路隧道施工风险评价。首先, 将评价目标偏压浅埋公路隧道施工风险进行逐层分解, 得到各级评价指标; 其次, 将最末层的指标评分赋值后, 通过无量纲化处理, 得出的结果再进行归一化运算; 然后, 将评价指标与突变模型一一对应, 用其归一化公式向高等级指标逐层进行运算, 直到得到评价目标的突变级数最终值为止; 最后, 根据评价等级标准和最终突变级数进行公路隧道施工风险分析评价。利用该方法对大岩阡隧道中地质勘察、施工控制、支护衬砌、监控测量四方面进行风险评价, 得出风险等级。该方法有效减少了人为赋值的主观性, 从而提高了评价的可靠性, 并且计算流程相对简单。该方法所得出的评价结果更加贴近实际情况, 更准确地反映了各评价指标的实际状况, 为实际工程提供了更有价值的信息支持。

关键词

公路隧道施工, 突变理论, 突变级数法, 偏压浅埋, 风险评价

Risk Assessment of Building of Expressway Tunnels with Unbalanced Loading and Shallow Coverage Based on Catastrophe Theory

Yichao Chu, Yaxiong Peng, Yu Pang

Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Nov. 23rd, 2024; accepted: Dec. 18th, 2024; published: Dec. 25th, 2024

文章引用: 褚羿超, 彭亚雄, 庞誉. 基于突变理论的偏压浅埋公路隧道施工风险评价[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2303-2313. DOI: 10.12677/hjce.2024.1312253

Abstract

The catastrophe theory is applied to mitigate the occurrence of risk accidents during the building of shallow coverage expressway tunnels, while a catastrophe progression method is put forward for assessing the risks connected with such building projects. Firstly, the building risk of a biased shallow coverage expressway tunnel is systematically decomposed, and the evaluation metrics are determined. Secondly, dimensionless processing is applied to assign an index score to the final layer, which is subsequently standardized. Subsequently, each evaluation index is matched individually with the catastrophe model, and high-level indices are calculated layer by layer using normalization formulas until the final catastrophe series value of the evaluation target is obtained. Finally, an analysis and assessment of expressway tunnel building risk is conducted based on both the evaluation grade standard and the final abrupt progression. The approach was applied to assess risks in four aspects of the Dayanqian Tunnel: geological investigation, construction oversight, support lining, and monitoring inspections. It yielded risk classifications. This method significantly reduces subjectivity in human-assigned values, enhancing the reliability of the assessment while maintaining a relatively straightforward calculation process. Its results better reflect real-world conditions, accurately reflecting the actual status of each evaluation criterion, thereby furnishing practical engineering projects with more valuable information.

Keywords

Building of Expressway Tunnels, Catastrophe Theory, Catastrophe Progression Method, Unbalanced Loading and Shallow Coverage, Risk Assessment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国家对基础设施建设的加速推进和公路网络的广泛拓展及优化,公路隧道的施工安全风险成为了各界关注的焦点。作为高速公路工程中的关键环节,隧道建设尤为重要,尤其是面对偏压且埋深较浅的地形时,因其地质与水文环境的复杂性以及施工的高难度,使得此类隧道易受坍塌、形变及裂缝等问题困扰,从而加剧了施工风险。

目前,针对偏压浅埋公路隧道攻克施工难度的研究已成为重要研究内容。江杰等[1]以广西玉象隧道为研究对象,对开挖后的围岩亚级分级,针对偏压浅埋来提出支护方案,并采用数值模拟证明优化该方案可行性。韩立志[2]对洞口段进行模型研究,通过对围岩和衬砌在不同材料下应力的变化进行分析,得出了双侧壁导坑法能提高偏压浅埋隧道施工的安全性。

因此,如何有效管控偏压浅埋隧道施工段的风险,并实施精确的安全风险评估,已成为当前施工领域亟待攻克的核心难题之一。国内外学者针对此施工风险评价进行了各方面的探讨。程远等[3]针对于茅山隧道六种风险事件,采取了定量分析方法,具体运用了层次分析法来进行安全风险评估,得出了相应风险的应对模型; Yazdani-Chamzini [4]聚焦于隧道施工过程中遇到的各种风险事件,创新性地融合模糊集理论与风险评估模型来进行施工风险的综合评判,其研究有效证实了该模型的实用性; Patrick 等[5]利用故障树分析、检查列表以及影响图等多种手段,对隧道施工风险实施了系统的控制分析,以深化理解并指导风险管理实践; 吴波等[6]以金台铁路五峰山隧道工程为例,在上软下硬的复合地层条件下构建了

隧道施工风险评价系统，运用熵权赋值法对影响因素权重进行确定，再运用多级模糊评价理论对其进行风险评价。

上述学者们在逐步研究中广泛应用层次分析、模糊集理论、故障树与熵权法，有效评价了公路隧道施工多元风险。但以上方法中仍面临着计算复杂及评价权重主观性强等问题。因此，本研究采用突变级数法，针对偏压浅埋段公路隧道施工风险进行评价，旨在消除权重设定的主观性，通过均衡考量指标间的重要性，增强评估的合理性和科学性，确保结果贴近实际，兼具高度可靠性和计算便捷性。

2. 突变级数法及其步骤

2.1. 突变理论

在 20 世纪 70 年代，法国数学家勒内·托姆提出了突变理论[7]，这是研究突变现象的新数学工具，其理论基础植根于拓扑学、结构稳定性及奇点理论等领域[8] [9]。在此基础上发展起来的突变级数法[10]，通过将评价对象细分成多级指标，自下而上逐层计算，将各层控制变量 x 应用于特定的突变模型 $f(x)$ ，并经由归一化处理获取突变隶属度值。这一过程迭代至顶层指标，最终得出整体突变级数值。在运算过程中，依据“非互补”(取最小值)和“互补”(取均值)两大原则，对评价指标进行区分处理，以实现精准分析。

2.2. 突变级数法的步骤

2.2.1. 评价指标体系

对评价指标体系依照重要程度进行层次化分解，建立树状图结构，将顶层的评价目标细分为下层的具体指标，每一级指标的控制变量一般不大于 4 个，按照重要性排列，划分的最末层指标可以赋值，如图 1 所示。

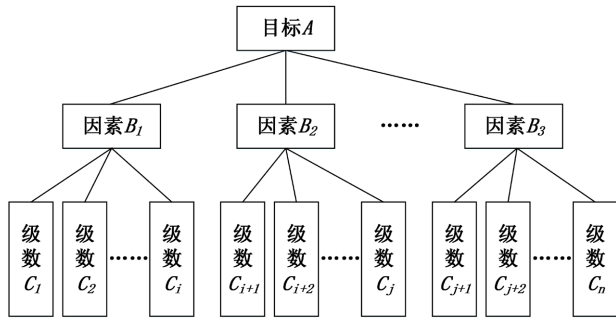


Figure 1. Hierarchical system diagram
图 1. 递阶层次结构图

2.2.2. 突变模型

突变模型通常分类为四种基本类型：折叠型、尖点型、燕尾型及蝴蝶型，系统示意图如图 2 所示。其表达式分别为：

$$f(x) = x^3 + ax \quad (1)$$

$$f(x) = x^4 + ax^2 + bx \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx \quad (4)$$

式中：\$x\$ 为突变模型中的一个状态变量；\$f(x)\$ 为突变模型中状态变量 \$x\$ 的控制变量。

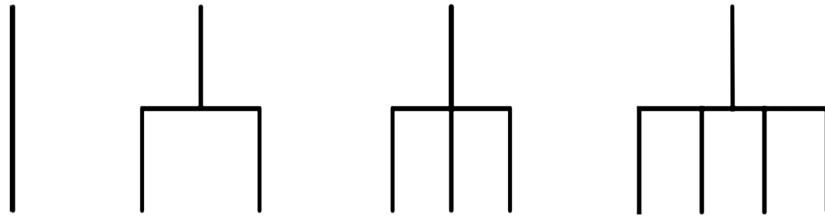


Figure 2. Indicator chart of four catastrophe model systems
图 2. 四种的突变模型系统示意图

2.2.3. 评价指标的无量纲化处理

评价指标通常有两种形式。一种是定性指标，通常通过专家评分等方式进行评估；另一种是定量指标，一般采用极差变换法等方法进行评价。定量指标可以根据其特性分为两类：一类是正向指标，得分越高，评价结果越好；另一类是逆向指标，得分越低，评价结果越好。

正向指标表达式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min(j)}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}} \quad (5)$$

逆向指标表达式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{\max(j)} - x_{ij}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}} \quad (6)$$

式中：\$y_{ij}\$ 为极差变换所得值；\$x_{ij}\$ 为原始数据；\$x_{\max(j)}\$ 为 \$j\$ 行最大取值；\$x_{\min(j)}\$ 为原始数为 \$j\$ 行最小取值。

2.2.4. 突变模型的归一化公式

在突变理论中，突变模型以势函数 \$f(x)\$ 为基础，其中平衡曲面由 \$f(x)\$ 的一阶导 \$f'(x)\$ 确定，奇点集则源自 \$f(x)\$ 二阶导 \$f''(x)\$。通过求解 \$f'(x)=0\$ 与 \$f''(x)=0\$ 的交集，可获得分岐点集，进一步导出折叠、尖点、燕尾和蝴蝶四种突变模型的规范化方程，表达式分别为：

$$x_a = \sqrt{|a|} \quad (7)$$

$$x_a = \sqrt{|a|}, x_b = \sqrt[3]{|b|} \quad (8)$$

$$x_a = \sqrt{|a|}, x_b = \sqrt[3]{|b|}, x_c = \sqrt[4]{|c|} \quad (9)$$

$$x_a = \sqrt{|a|}, x_b = \sqrt[3]{|b|}, x_c = \sqrt[4]{|c|}, x_d = \sqrt[5]{|d|} \quad (10)$$

式中：\$x_a\$、\$x_b\$、\$x_c\$、\$x_d\$ 分别为各式中 \$a\$、\$b\$、\$c\$、\$d\$ 对应的 \$x\$ 值。

2.2.5. 利用归一化公式进行综合评价

在评价体系中，各指标的 \$x\$ 值通过归一化公式计算，采用“互补”或“非互补”原则。“互补”意味着如果系统内不同的控制变量可以相辅相成，则将其隶属函数均值作为 \$x\$。“非互补”情况则依据“最弱点决定”原则，选取最小隶属函数值代表 \$x\$。“互补”原则下，根据式(3)~(6)先计算各突变隶属函数值为：\$x = x_a\$，\$x = \frac{x_a + x_b}{2}\$，\$x = \frac{x_a + x_b + x_c}{3}\$，\$x = \frac{x_a + x_b + x_c + x_d}{4}\$。随后汇总得出总突变级别。而对于“非

互补”原则，逐个计算各变量的突变隶属值 $x = \{x_a, x_b, x_c, x_d\}_{\min}$ ，得出总突变级数值，并依据预设的分级标准进行深入剖析。

3. 实例应用与分析

3.1. 工程概况

大岩阡隧道为分离式短隧道，长度未超过 200 米，进出口洞门均采用偏压式。左线起始桩号 ZK38+015.500~ZK38+090，长 74.5m；右线起始桩号 K37+919.500~K38+090，长 170.5 m。隧址区属低山地貌，地形起伏虽大，但场地及地层层位稳定，地表排水条件良好，因此可判断本场地属于较适宜建设场地。

拟建隧道大岩阡隧道洞身主要由全 - 中风化白云质灰岩组成，岩体完整性指数平均值为 0.45，属于较破碎岩体。该岩体节理裂隙较为发育，其呈现张开 - 微张的状态。隧道洞身围岩 BQ = 165~225，围岩级别为 V 级，总体较稳定，但隧道位于山体斜坡上，进出口段山体坡度约 30°~65°，左、右线设计轴线均与地形线斜交，存在偏压现象，应考虑偏压对洞身段洞壁的不利影响，加强侧壁支护。由于隧道单侧临斜坡，埋深较浅，为防止施工时隧道仰坡、边坡偏移失稳及坡体表层碎石产生坍塌现象，施工时有必要重点关注防护措施。

3.2. 隧道施工风险等级

隧道施工风险评价作为施工全过程的关键性步骤，对降低风险至关重要[11]。偏压浅埋公路隧道施工因复杂的工程环境与水文地质因素，面临高难度与高风险挑战，极易引发坍塌、偏移及渗水等事故，因此需要构建合理风险分级体系，其主要目标有：① 提高施工安全意识，预防灾害发生，强化施工过程的监督与管理，确保作业安全。② 加强施工期间的监控措施，遇到问题可以及时调整施工方案来避险。③ 降低隧道施工的风险，提高处理突发事件的能力。

为了达到上述目的，不宜设置过多的风险等级。因此，将偏压浅埋公路隧道施工风险划分为绿、黄、橙、红四级。绿色等级表示隧道无施工风险，可按照预定的隧道设计方案进行施工建设；黄色代表有较低的施工风险，隧道施工可以正常进行，但需要加强监控量测的频率；橙色代表隧道施工风险适中，但需要及时支护从而确保隧道安全施工；红色代表高风险状态，隧道存在随时发生重大事故的风险，必须保证各项数据稳定，才能开始施工，必要时需要停工。最后进行风险等级指标分级，其标准如表 1 所示。

Table 1. Indicator grading criteria

表 1. 指标分级标准

风险等级	红	橙	黄	绿
评分值(0~1)	0~0.25	0.26~0.5	0.51~0.75	0.76~1

3.3. 施工风险评价因素及指标分级标准

结合工程现场实际调研成果，在偏压浅埋公路隧道工程风险辨识研究中，以整个施工程序为逻辑主线，通过调查大岩阡隧道工程主要风险因素，从地质勘察 B_1 、施工控制 B_2 、支护衬砌 B_3 、监控测量 B_4 四大方面构建指标体系，已完成构建包含 13 个二级指标的隧道工程风险评估体系[12] [13]。如图 3 所示，进行具体描述：

1) 地质勘察 B_1

隧道施工安全的首要因素在于其所处的地质环境状况，施工过程中的地质风险包括岩体强度及结构

面 C_1 、地表水和地下水 C_2 、偏压程度 C_3 和偏压浅埋程度的影响 C_4 。

岩体强度和结构面 C_1 是反映岩石的力学性能以及岩体整体性的一个量值, 通常由高到低分为完整、较完整、较破碎和破碎。岩体完整性越低, 越容易发生失稳, 反之强度越大岩石越易保持自身的完整性。软弱结构面相比于围岩, 其力学强度更低, 且对岩体的稳定性起着关键性作用, 其强度越大岩体整体性则更优, 更易于保持稳定[14]。

地表水和地下水 C_2 受季节降水影响较大, 地表水主要通过灌溉和蒸发排走, 地下水则快速入渗径流至低处, 水量不大, 对隧道施工影响有限。然而, 该地区地下水分布不均, 土层疏松、渗透性强, 易从岩石缝隙渗入, 极易增加渗透和涌水风险。

偏压地形 C_3 由于围岩不对称, 隧道受偏压荷载影响严重, 导致隧道两侧受力不均, 易发生单侧偏移情况。其中偏压程度用偏压率来表示, 偏压率越高, 施工风险越大, 冒顶、垮塌事故风险越大。

浅埋地形 C_4 在开挖过程中会出现拱顶下沉过快, 边墙收敛严重, 地表在浅埋交界处附近产生裂缝, 对施工安全影响极大。

2) 施工控制 B_2

隧道开挖过程中不可避免地会出现诸多问题, 在进、出洞开挖时, 采取合适的施工方式同时控制施工速度非常关键。由于偏压浅埋使得隧道受力不对称, 易发生偏移、开裂甚至坍塌等风险, 所以为了使开挖风险降到最低限度, 从开挖进尺方式 C_5 、偏压段整体偏移 C_6 和浅埋段侧壁变形 C_7 三个方面来评价。

开挖进尺方式 C_5 直接受作业场区、不同围岩及施工环境的影响, 应采用适应现场条件的开挖方式, 包括全断面开挖、核心土留置法、台阶法及双侧壁导坑法等。这样更容易降低安全隐患, 对施工安全和质量产生有利影响, 因此要重点关注开挖方式选择, 加以安全支护, 创造良好的开挖环境。

隧道偏压段 C_6 由于隧道拱顶受压不均匀, 压力偏大的一侧会产生应力集中, 沉降就会偏大。一般来说, 在侧向压力的持续作用下, 隧道出现变形和移位, 产生裂缝后还会引起渗漏水, 施工风险极大。

隧道浅埋段 C_7 由于隧道不完整的自承体系, 拱顶上部地表覆盖层很薄, 基本为浅埋碎石土, 形成不了结构承载力, 如果支护处理不当, 容易造成塌方和冒顶的风险。

3) 支护衬砌

支护衬砌可以有效地减小围岩变形, 增大其稳定性, 减少了洞内坍塌的风险, 提高工人施工作业的安全性, 因此隧道开挖后必须进行有效的、可靠的支护衬砌[15]。针对支护衬砌施工中各种因素对隧道施工风险的影响, 提出了三个评价指标。

地表加固 C_8 主要应用于隧道洞口段。偏压浅埋洞口段围岩破碎, 施工进尺会破坏其整体性, 为了提高其安全性和稳定性, 可采取的地表预加固技术有声波法注浆、地面锚杆和高压喷射混凝土等。因此, 地表加固为反映降低施工风险的重要指标。

隧道侧向支护 C_9 是针对偏压浅埋隧道洞侧支护最为重要的手段, 主要方式有打抗滑桩、建设挡土墙, 可以有效地增强隧道侧向压力, 减少偏移的发生; 或者采用回填反压的方式, 均衡隧道两侧围岩压力, 尽可能避免施工事故的发生。

衬砌浇筑成型 C_{10} 既可以防止渗漏水也可以起到支护围岩的作用。隧道内发生漏水, 内部的施工设备在潮湿环境下会受到锈蚀危害的威胁, 使设备安全性降低, 同时使隧道衬砌结构发生破坏。

4) 监控测量 B_4

通过隧道监控量测可以使施工人员及时获得隧道施工中各时刻各阶段的地层和支护结构的情况, 同时也能对支护衬砌和围岩等结构的稳定性迅速做出判断, 得出其可靠性程度。并根据这些问题采取相应的措施以确保洞内外施工和围岩结构的稳定。之后还可以通过分析测量结果进而对施工方案进行调整,

例如对围岩等级、支护设计参数等调整，整体上来增强隧道施工的安全性以及工程质量。

通过应用抗滑桩或挡土墙 C_{11} 对偏压浅埋段边坡进行支护，因此需要在整个施工阶段对其位置进行监控测量来保证施工安全，在产生异常的偏移时可以及时预警，对此类型隧道有很重要的作用。

通过进行围岩变形检测 C_{12} 可以推断出前方路段概率发生的围岩稳定性问题，对设计方案和施工安全起到指导作用。

爆破振动 C_{13} 对隧道自身、周边环境物均会造成一定的影响。因此需要在爆破前进行合理设计规划波及范围，爆破时利用仪器及时检测各项数据，爆破后再次对隧道以及周边检测分析，来避免出现安全事故[16]。

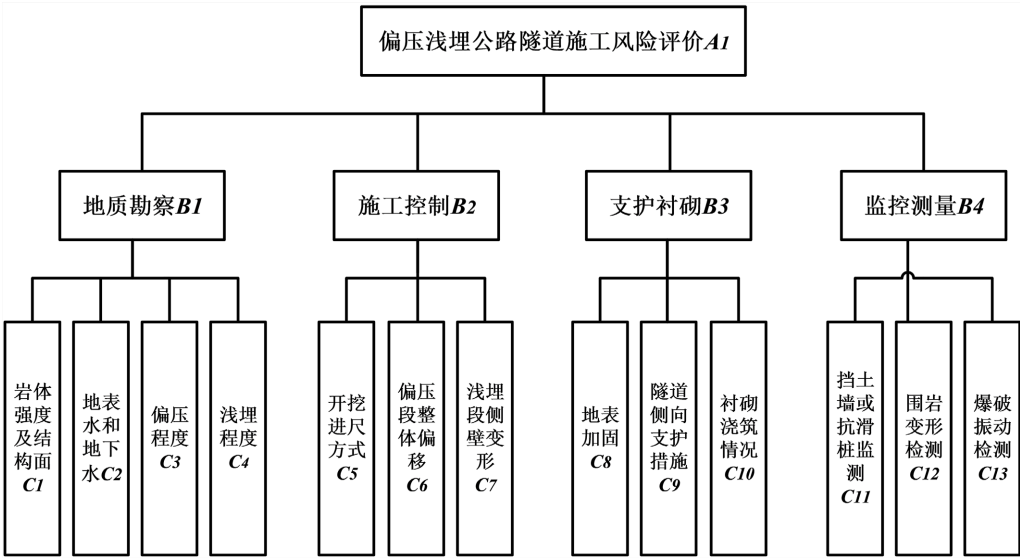


Figure 3. Building risk assessment indicator framework for biased shallow tunnels
图 3. 偏压浅埋隧道施工风险评价指标体系

3.4. 指标分数的确定

为确保评价结果的准确性和合理性，邀请 5 位参与该项目经验丰富的专家，以及 5 位长期从事隧道风险评估的专家学者，根据项目实际情况对底层指标进行打分，评分如表 2 所示。对应二级指标取平均值如表 3 所示。

Table 2. Evaluation indicators scoring results of consequences
表 2. 评价指标专家打分结果

指标 编号	专家打分									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C ₁	73	77	75	81	78	77	69	67	70	65
C ₂	93	88	90	87	89	90	95	86	88	89
C ₃	77	78	71	74	69	70	74	75	79	77
C ₄	73	66	65	67	68	69	65	65	64	65
C ₅	85	84	82	81	85	87	82	80	80	81

续表

C ₆	78	76	75	77	79	78	78	74	70	79
C ₇	70	78	77	75	79	76	77	74	73	79
C ₈	55	58	54	67	60	58	54	63	65	61
C ₉	76	67	77	78	76	75	54	56	67	58
C ₁₀	65	64	74	78	79	77	75	65	75	76
C ₁₁	60	65	64	67	68	63	62	66	64	68
C ₁₂	76	65	59	58	60	62	63	66	58	56
C ₁₃	78	81	76	79	80	71	70	75	79	77

Table 3. Dayanqian tunnel’s mean value of building risk score
表 3. 大岩阡隧道施工风险评分均值

目标层	一级指标	二级指标	评分值(平均)
偏压浅埋隧道施工风险评价 A ₁	地质勘查 B ₁	岩体强度及结构面 A ₁	73.2
		地表水和地下水 A ₂	89.5
		偏压程度 A ₃	74.4
		浅埋程度 A ₄	66.7
		开挖进尺方式 B ₅	82.7
	施工控制 B ₂	偏压段发生整体偏移 B ₆	76.4
		浅埋段发生侧壁变形 B ₇	75.8
	支护衬砌 B ₃	地表加固 C ₈	59.5
		隧道侧向支护措施 C ₉	68.4
		衬砌浇筑情况 C ₁₀	72.8
		抗滑桩或挡土墙监测 D ₁₁	64.7
	监控测量 B ₄	围岩变形检测 D ₁₂	62.3
		爆破振动检测 D ₁₃	76.6

3.5. 隧道施工风险评价的突变级数模型

参照图 1 的指标体系与图 2 所示的突变模型配置，各指标的突变模型应用具体如下：

- (1) C₁、C₂、C₃、C₄ 组成蝴蝶突变模型[17]，并且 C₁、C₂、C₃、C₄ 采用非互补原则；
- (2) C₅、C₆、C₇ 组成燕尾突变模型，并且 C₅、C₆、C₇ 采用非互补原则；
- (3) C₈、C₉、C₁₀ 组成燕尾突变模型，并且 C₈、C₉、C₁₀ 采用互补原则；
- (4) C₁₁、C₁₂、C₁₃ 组成燕尾突变模型，并且 C₁₁、C₁₂、C₁₃ 采用非互补原则。

3.6. 评分结果无量纲化处理

专家打分的原则是安全状态越好，分数就越高，故采用正指标。对表 2 和表 3 中的所有指标数据执行无量纲化转换，并依据公式(5)进行计算，所有指标评分标准化结果如表 4 所示。

Table 4. Standardized values for secondary indicators
表 4. 二级指标标准化值

二级 指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃
标准 化值	0.513	0.389	0.540	0.300	0.386	0.711	0.644	0.423	0.600	0.587	0.588	0.315	0.600

3.7. 计算突变隶属函数值

1) C₁、C₂、C₃、C₄ 与 B₁ 分别组成蝴蝶突变模型，按式(10)计算且采用非互补原则，则：

$$\begin{aligned}x_{C_1} &= \sqrt{0.513} = 0.7159 \\x_{C_2} &= \sqrt[3]{0.389} = 0.7300 \\x_{C_3} &= \sqrt[4]{0.540} = 0.8572 \\x_{C_4} &= \sqrt[5]{0.300} = 0.7860 \\x_{B_1} &= \min(x_{C_1}, x_{C_2}, x_{C_3}, x_{C_4}) = 0.7159\end{aligned}$$

2) C₅、C₆、C₇ 与 B₂ 分别组成燕尾突变模型，按式(9)计算且采用互补原则，则：

$$\begin{aligned}x_{C_5} &= \sqrt{0.386} = 0.6213 \\x_{C_6} &= \sqrt[3]{0.711} = 0.8925 \\x_{C_7} &= \sqrt[4]{0.644} = 0.8958 \\x_{B_2} &= \min(x_{C_5}, x_{C_6}, x_{C_7}) = 0.6213\end{aligned}$$

3) C₈、C₉、C₁₀ 与 B₃ 分别组成蝴蝶突变模型，按式(9)计算且采用互补原则，则：

$$\begin{aligned}x_{C_8} &= \sqrt{0.423} = 0.6504 \\x_{C_9} &= \sqrt[3]{0.600} = 0.8434 \\x_{C_{10}} &= \sqrt[4]{0.587} = 0.8753 \\x_{B_3} &= \frac{x_{C_8} + x_{C_9} + x_{C_{10}}}{3} = 0.7897\end{aligned}$$

4) C₁₁、C₁₂、C₁₃ 与 B₄ 分别组成燕尾突变模型，按式(9)计算且采用非互补原则，则：

$$\begin{aligned}x_{C_{11}} &= \sqrt{0.588} = 0.7665 \\x_{C_{12}} &= \sqrt[3]{0.315} = 0.6804 \\x_{C_{13}} &= \sqrt[4]{0.600} = 0.8801 \\x_{B_4} &= \min(x_{C_{11}}, x_{C_{12}}, x_{C_{13}}) = 0.6804\end{aligned}$$

3.8. 计算突变级数值

B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 与 A 共同构成了蝴蝶突变模型, 依据第 3.7 节的计算结果, 运用式(10)进行计算时融入了“非互补”原则, 则可求出大岩阡隧道的施工风险评价的突变级数值:

$$x_A = \min(x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}, x_{B4}) = 0.8461$$

表 4 中对应的数值通过归一化公式计算汇总, 最后总体数值如表 5 计算所示。

Table 5. Results of building risk evaluation of Dayanqian tunnel

表 5. 大岩阡隧道施工风险评价结果

一级指标	二级指标	标准化值 y_i	二级指标突变级数 X_{ci}	二级指标值 y_{bi}	一级指标突变级数 X_{bi}	总突变隶属函数值 X_a
B_1	C_1	0.513	0.7159	0.7159	0.8461	0.8461
	C_2	0.389	0.7300			
	C_3	0.540	0.8572			
	C_4	0.300	0.7860			
B_2	C_5	0.386	0.6213	0.6213	0.8532	
	C_6	0.711	0.8925			
	C_7	0.644	0.8958			
	C_8	0.423	0.6504			
B_3	C_9	0.600	0.8434	0.7897	0.9427	
	C_{10}	0.587	0.8753			
	C_{11}	0.588	0.7665			
B_4	C_{12}	0.315	0.6804	0.6804	0.9259	
	C_{13}	0.600	0.8801			

3.9. 安全状态评价结果

大岩阡隧道施工风险评价总突变隶属度值为 $0.8461 \in [0.76, 1.00]$, 对照表 1, 风险评价等级为绿色, 即安全性较好, 基本无施工风险, 与施工项目中实际状况较为一致, 可按预定施工方案施工。通过分析一级指标如 B_1 、 B_4 的值分别为 0.7159、0.6804, 可以看出对施工风险评价影响较大的是地质勘查和监控测量, 特别是对偏压浅埋地形和挡土墙、抗滑桩监控量测需给予重点关注, 并加强管控力度以及治理措施[18]。

4. 结论

本研究深度整合了突变理论的核心原理, 构建了一套适用于偏压浅埋公路隧道施工的全面风险评价指标体系。该方法论不仅极大地增强了风险状态判断的精确度与直观性, 还显著提升了根据即时风险评估结果灵活调整安全管理策略的能力, 确保了施工过程的安全高效。以大岩阡隧道这一实际工程项目为研究案例, 我们深入分析了施工过程中可能存在的多维度风险因子, 通过对指标评价计算分析, 最终得

出总突变隶属函数值 0.8461, 有效识别了一系列潜在风险隐患, 并针对性地提出了改进建议与防控策略, 对风险影响较大项目需重点关注, 从而为类似偏压浅埋隧道建设项目提供了宝贵的实战经验和可操作的安全管理指南, 有助于预防未来可能发生的事故, 保障人员安全与工程顺利进行。此外, 本研究充分认识到, 隧道施工风险评估是一个复杂且动态的过程, 其评价指标体系极易受到多种不确定性因素的影响, 包括但不限于地域地质特性、项目管理方式和工程规模等。这些差异要求我们在构建风险评估体系时必须具备高度的灵活性与适应性。因此, 未来的研究方向应当聚焦于如何进一步细化和优化这套指标体系, 使之能更加精准地贴合不同项目和环境的具体需求, 提升风险预测与防控的精准度, 从而在全球范围内推动隧道建设行业的安全生产水平迈向新的高度。

基金项目

湖南省教育厅科学研究项目(22B0486); 江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室、江汉大学爆破工程湖北省重点实验室联合开放基金资助项目(PBSKL2022D08)。

参考文献

- [1] 江杰, 蒲鸥, 刘刚伯, 等. 基于围岩亚级分级的浅埋偏压隧道初期支护优化方法研究[J]. 公路, 2017, 62(2): 218-223.
- [2] 韩立志. 浅埋偏压隧道双侧壁导坑法开挖数值模拟研究[J]. 公路, 2020, 65(5): 324-328.
- [3] 程远, 刘志彬, 刘松玉, 等. 基于层次分析法的大跨浅埋公路隧道施工风险识别[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 198-202.
- [4] Yazdani-Chamzini, A. (2014) Proposing a New Methodology Based on Fuzzy Logic for Tunnelling Risk Assessment. *Journal of Civil Engineering and Management*, **20**, 82-94. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.843583>
- [5] Zou, P.X.W., Zhang, G. and Wang, J. (2007) Understanding the Key Risks in Construction Projects in China. *International Journal of Project Management*, **25**, 601-614. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.03.001>
- [6] 吴波, 陈辉浩, 黄惟. 基于熵权模糊理论的上软下硬地层隧道施工风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 1056-1063.
- [7] 张明, 付冬梅, 程学群, 等. 基于变量选择的尖点突变模型的两步构建方法[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 128-136.
- [8] 史志富, 张安, 刘海燕, 等. 基于突变理论与模糊集的复杂系统多准则决策[J]. 系统工程与电子技术, 2006(7): 1010-1013.
- [9] 都兴富. 突变数学及其在经济中的应用[J]. 社会科学研究, 1988(6): 119-121.
- [10] 王永祥, 吴滔, 李亮, 等. 基于突变级数法的地铁盾构施工安全风险评价[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(1): 95-102.
- [11] 周泽林, 张凯, 张恒, 等. 属性识别理论下的岩溶隧道地表塌陷风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11): 105-112.
- [12] 刘平, 王宇, 李强年. 极端降雨天气下地铁隧道施工安全评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4222-4229.
- [13] 桂志敬, 吴忠广, 严琼, 等. 公路隧道施工安全风险评估方法优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 136-143.
- [14] 彭亚雄, 周子霁, 姚颖康, 等. 爆破作用下层状围岩隧道突变失稳判据研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 171-178.
- [15] 邹建华, 谭捍华, 张学民. 连拱隧道初支结构稳定性评价及施工方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1362-1367.
- [16] 符永星. 隧道洞身开挖爆破施工技术研究[J]. 公路, 2019, 64(5): 306-309.
- [17] 杨超. 基于蝴蝶突变理论的城市突发事件研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(S1): 235-242.
- [18] 苗景川, 陈诺, 郑文飞, 等. 粉砂质泥岩浅埋偏压隧道洞口段大变形机理及治理措[J]. 水电能源科学, 2023, 41(11): 133-137.