

# 复杂地质条件下 TBM 施工风险评价方法及系统研发

陈奕捷,詹金武,苏承校,王佳程,武玉娇,杨炽誉

(福建理工大学 土木工程学院,福建 福州 350118)

**摘要:** 为实现对复杂地质条件下 TBM 施工安全风险快速、量化评价,综合运用 WBS-RBS 法与因子分析法,构建了包含 7 个准则层 20 个指标层的 TBM 施工风险评价指标体系;结合层次分析法与模糊综合评价法,确定各项评价指标的权重与隶属函数,建立了风险评价模型;基于风险评价模型,应用专家系统方法与 Java 语言开发了一套集成化的 TBM 施工安全风险评价系统。应用该评价系统对云南高黎贡山隧道工程出口段 TBM 施工进行评价,评价结果与工程实际情况相符,表明该评价系统能够对复杂地质条件下 TBM 施工风险提供科学、有效的评价。

**关键词:** TBM; 风险评价; 复杂地质; 模糊数学; 专家系统

中图分类号: TV523

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0035-09

## Development of risk evaluation method and system for TBM construction under complex geological conditions

CHEN Yijie, ZHAN Jinwu, SU Chengxiao, WANG Jiacheng, WU Yujiao, YANG Chiyu

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** To achieve rapid and quantitative risk evaluation for TBM construction under complex geological conditions, the WBS-RBS method and factor analysis method are used to construct a TBM construction risk evaluation index system including 7 criterion layers and 20 index layers. The analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation are combined to determine indicator weights and membership functions, forming the risk evaluation model. Based on this model, an integrated TBM construction safety risk evaluation system is developed by using expert system method and Java language. Case validation based on the Gaoligongshan Tunnel project in Yunnan demonstrated that the system's output aligns with the actual engineering situation, confirming its value as a scientific and effective tool for risk evaluation in complex geological settings.

**Keywords:** TBM; risk evaluation; complex geology; fuzzy mathematics; expert system

TBM (tunnel boring machine, 隧道掘进机) 依靠刀盘驱动与推进系统,使滚刀在高压下挤压和剪切岩体实现破岩掘进,并同步完成渣土输送、管片安装与壁后注浆等一系列作业,形成一个高度机械化的连续施工闭环<sup>[1-2]</sup>。在复杂多变的地质条件下,TBM 施工受到诸多不确定因素的制约。因此,为有效应对施工风险,需要建立相应的施工风险评价指标体系,并以此为基础对 TBM 施工的

各个环节进行科学的风险评价,以保障 TBM 施工安全管理体系有效运行。

Mirhabibi A 等<sup>[3]</sup> 利用仿真软件对地表沉降、隧道埋深和建筑刚度等因素进行风险模拟,评估各因素在地铁施工中的重要性及相互作用,提出地表沉降是影响地表建筑安全的主要因素。Sousa Rita L 等<sup>[4]</sup> 通过对隧道施工过程中地质条件的深入分析,提出一种基于地质预测的风险评价方法。尹俊

收稿日期:2024-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008111);福建省自然科学基金资助项目(2022J05185)

第一作者简介:陈奕捷(2002—),男,福建莆田人,硕士研究生,研究方向:岩土工程。

通信作者:詹金武(1989—),男,福建莆田人,副教授,博士,研究方向:岩土工程、地下工程。

涛等<sup>[5]</sup>对 TBM 掘进过程中可能遭遇的断层破碎带、隧道塌方、地下水突涌、有害气体、高地温、围岩挤压大变形以及岩爆等风险因素,提出了优化的风险处理措施。陈馈等<sup>[6]</sup>从周边环境(地质和水文条件)、设备自身状况以及施工人员三个维度分析总结了 TBM 施工风险的成因。董勇<sup>[7]</sup>聚焦不良地质、下穿建筑物、小间距隧道施工和过站施工四种 TBM 施工风险因素,进行成因分析,并结合重庆某隧道工程实例,验证了该风险分析框架的实用性。王晓磊<sup>[8]</sup>以深圳地铁项目为依托,构建了盾构施工风险评价层次分析模型,并运用模糊层次分析法对该地铁项目进行评价,给出了针对性的风险处置建议。

国内外在隧道施工风险领域已积累了丰富成果,但针对复杂地质条件下 TBM 施工的、能够系统整合多源风险因素并进行快速、量化综合评价的方法体系仍待完善。本研究采用 WBS-RBS (work breakdown structure - resource breakdown structure,工作分解结构-风险分解结构)法分析、辨识风险因素,并结合层次分析法与模糊综合评价法,构建了 TBM 施工风险评价指标体系与模型。确定各风险因素的隶属函数和权重,依据城市轨道交通的普遍实践划分风险等级,可以实现基于综合权重的风险等级判断。并且,应用专家系统方法与模糊数学理论,开发了一套 TBM 施工安全风险评价系统,为 TBM 施工过程中的风险评估与管理提供辅助决策建议。

## 1 TBM 施工风险评价指标体系

### 1.1 TBM 施工风险因素的辨识

应用 WBS-RBS 法进行风险辨识,可较为全面地识别各类风险因素,以减少遗漏。首先应用工作分解结构(WBS)法,将 TBM 施工流程分为准备、始发、掘进、到达等四个主要施工阶段并逐级分解,形成边界清晰且便于风险识别的基本工作单元;再应用风险分解结构(RBS)法,将引起 TBM 施工安全风险的风险源分为人、设备、材料、技术、环境等五大因素并逐级分解,形成风险分解结构。

将施工基本工作单元与风险分解结构两两耦合,构建 WBS-RBS 风险辨识耦合矩阵,用以系统地判断各项风险存在的可能性。基于该矩阵的识别结果,对风险因素进行整理、归并与筛选,建立了包含 7 个准则层 34 个指标层的 TBM 施工风险指标体系的初始判断。如表 1 所示。

表 1 TBM 施工风险指标体系初始判断

Tab.1 Initial judgment of risk criteria layers for TBM construction

目标层	准则层指标	指标层指标
周边环境 A1		地表沉降 B1
		下穿既有道路 B2
		燃气管线变形 B3
		排水管道变形 B4
		临近建筑物 B5
地质条件 A2		岩体完整程度 B6
		岩石风化程度 B7
		岩石单轴抗压强度 B8
隧道管理 与设计 A3		施工管理人员水平不足 B9
		各部门协调能力差 B10
		隧道通风 B11
不良地质 问题 A4		隧道设计埋深 B12
		岩体失稳 B13
		软岩 B14
		隧道渗水 B15
		TBM 穿越断层破碎带 B16
复杂地质条件下 TBM 施工 安全风险 评价初始指标		隧道塌方 B17
		岩爆 B18
		地下水突涌 B19
		TBM 设备的通电 系统故障 B20
		TBM 设备 自身 A5
设备安装 A6		机体卡机 B22
		TBM 直径不合理 B23
		注浆功率不够 B24
		泥水配比不恰当 B25
		刀盘卡顿 B26
材料选取 A7		刀盘、刀具损坏 B27
		TBM 刀盘、刀具的 地质适应性差 B28
		刀盘贯入度不足 B29
		管片受损 B30
		管片数量不足 B31
		钢材质量不合格 B32
		管片厚度不足 B33
		泥水配比不恰当 B34

### 1.2 TBM 施工风险评价指标体系的建立

分析表 1 中各项指标发现,有的指标之间相互关联,有的指标无法被定量描述,若对这些指标不加筛选地进行评价,可能产生重复工作,或评价困难。因此邀请 20 位隧道工程领域专家,以问卷调查的形式对各风险因素的重要性进行评分,应用 SPSS 统计软件对问卷调查结果进行统计分析,依据分析结果对表 1 中的各项指标进行筛选。

以周边环境这一准则层指标为例,应用 SPSS 统计软件对其问卷调查结果进行分析,提取出 3 个主成分因子,累积方差贡献率为 89.930%,因子荷载矩阵如表 2 所示。

表 2 周边环境因子荷载矩阵

Tab.2 Load matrix of surrounding environmental factors

周边环境	成分		
	1	2	3
地表沉降 B1	0.937	0.040	0.055
下穿既有道路 B2	0.789	0.418	0.224
燃气管线变形 B3	0.052	0.938	0.143
排水管道变形 B4	0.467	0.766	0.250
临近建筑物 B5	0.139	0.208	0.966

提取因子荷载超过 0.5 的公因子,得到以下结果:因子 1 包含风险因素 B1 和 B2,均与施工过程中 TBM 穿越现有道路相关,因此,因子 1 被命名为“TBM 穿越现有道路”。因子 2 由风险因素

B3 和 B4 构成,主要涉及地下管线的变形问题,因此,因子 2 被命名为“地下管线变形”。因子 3 仅包含风险因素 B5,故仍命名为“临近建筑物”。

同理,应用 SPSS 统计软件分析地质条件、不良地质、施工管理、施工设计、施工操作和设备自身等准则层指标的问卷调查结果并进行因子分析,最终确定了分三个层次,包括 7 个准则层 20 个指标层的 TBM 施工风险评价指标体系,如图 1 所示。

## 2 TBM 施工风险评价指标相关隶属函数及权重

### 2.1 TBM 施工风险评价指标模糊隶属函数

在复杂地质条件下 TBM 施工风险评价中,如“岩爆”、“断层破碎带”等风险因素,难以用精确的数值界定,具有显著的模糊性。因此,引入模糊数学理论,将定性描述的经验转化为定量的数学语言,实现定性描述的定量分析。模糊数学理论的核心是模糊集合,与经典集合中元素与集合的归属关系(用 0 或 1 表示)不同,模糊集合通过隶属函数描述元素属于该集合的“程度”,将元素的隶属度定义在[0,1]区间内,隶属度越接近 1,表示隶属程度越高。因此,应用基于模糊数学的模糊综合评价法的关键是构建符合客观规律的隶属函数。

参考文献[9-28],构建 TBM 施工风险评价指标体系中 7 个准则层对应的 20 个指标层指标的隶属函数,隶属函数均为线性方程,如表 3 为不良地质(Q<sub>3</sub>)准则层对应的 6 个指标层指标的隶属函数。

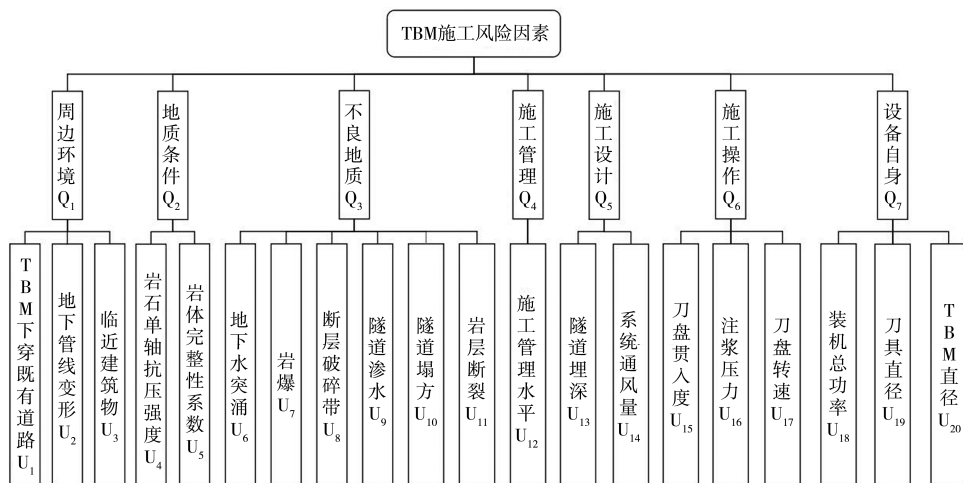


图 1 TBM 施工风险评价指标体系

Fig.1 TBM construction risk evaluation index system

表 3 不良地质(Q<sub>3</sub>) 准则层各指标层指标隶属函数

Tab.3 Membership functions for indicators in unfavorable geology (Q3) criterion layers

准则层	指标层(x 的含义)	隶属函数(单位)
不良地质 Q <sub>3</sub>	地下水突涌 U <sub>6</sub> <sup>[15]</sup> (最大集中突涌水量)	$u_6(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.1 \\ \frac{5-x}{5-0.1} & 0.1 < x \leq 5 \quad (\text{万 m}^3/\text{d}) \\ 0 & x > 5 \end{cases} \quad (1)$
	岩爆 U <sub>7</sub> <sup>[16-17]</sup> (围岩强度压力比)	$u_7(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 1 \\ \frac{x-1}{4-1} & 1 < x \leq 4 \\ 1 & x > 4 \end{cases} \quad (2)$
	断层破碎带 U <sub>8</sub> <sup>[18]</sup> (破碎带宽度)	$u_8(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 2 \\ \frac{30-x}{30-2} & 2 < x \leq 30 \quad (\text{m}) \\ 0 & x > 30 \end{cases} \quad (3)$
	隧道渗水 U <sub>9</sub> <sup>[17]</sup> (透水率)	$u_9(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 1 \\ \frac{100-x}{100-1} & 1 < x \leq 100 \quad (\text{Lu}) \\ 0 & x > 100 \end{cases} \quad (4)$
	隧道塌方 U <sub>10</sub> <sup>[19]</sup> (围岩基本质量指标 BQ)	$u_{10}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 351 \\ \frac{x-351}{550-351} & 351 < x \leq 550 \\ 1 & x > 550 \end{cases} \quad (5)$
	岩层断裂 U <sub>11</sub> <sup>[20-21]</sup> (围岩强度应力比)	$u_{11}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.2 \\ \frac{x-0.2}{0.45-0.2} & 0.2 < x \leq 0.45 \\ 1 & x > 0.45 \end{cases} \quad (6)$

以隧道塌方 U<sub>10</sub> 为例,其隶属函数的构建以及分段区间,依据《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)<sup>[19]</sup>中的相关规定确定,即:隧道塌方与围岩开挖后的稳定状态有关系,围岩稳定状态以围岩基本质量指标(BQ)划分,如表 4 所示。

表 4 围岩开挖后的稳定状态

Tab.4 Stable state of surrounding rock after excavation

评价标准	低风险	中度风险	高风险	极高风险
稳定状态	稳定	可能坍塌	易坍塌	极易坍塌
围岩基本质量指标 BQ	>550	550~450	450~351	<351

2.2 TBM 施工安全风险评价指标权重确定

各指标层指标的权重直接体现了其在整体评价模型中的相对重要性,可采用层次分析法定量计算<sup>[29-30]</sup>。因此,运用 Java 语言根据层次分析法原理编写权重计算辅助程序用以计算权重。

计算步骤为:先建立层次结构,将模糊评价分为目标层、准则层和指标层,其中目标层为评价对象,准则层和指标层分别为各级决策对象的影响因素;再应用层次分析法的 1-9 标度法(两元素之间的重要性比较)构建准则层和指标层影响因素的判断矩阵  $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ ,其中,  $a_{ij}$  为因素  $i$  与  $j$  的相对重要性,  $n$  为矩阵的阶数;最后,进行层次单排序及一致性检验和层次总排序及一致性检验。

根据一致性矩阵的定义,判断矩阵满足一致性矩阵的条件是因素  $i$  与  $j$  的相对重要性满足:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (7)$$

式中,  $w_{i(j)}$  为第  $i(j)$  个元素的权重。

然而,在实际应用中,判断矩阵难以完全满足一致性条件。为了量化地衡量判断矩阵偏离一致性的程度,根据式(8)、式(9)对判断矩阵进行一致性检验,当  $CR < 0.1$  时,满足一致性检验。

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (8)$$

$$CR = CI/RI \quad (9)$$

式中,CI 为一致性指标; $\lambda_{max}$ 为最大特征值;CR 为随机一致性比率;RI 为随机一致性指标,按表

表 5 RI 值  
Tab.5 RI value

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.514 9	0.893 1	1.118 5	1.249 4	1.345 0	1.420 0	1.461 6	1.487 4

然后,基于单排序权重确定指标层指标  $U_i$  对于目标层  $O$  的总排序权重,并根据式 (10) 进行总排序一致性检验。

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m CI(j)\omega(j)}{\sum_{j=1}^m RI(j)\omega(j)} \quad (10)$$

式中,CI( $j$ )为第  $j$  个准则对应的判断矩阵的一致性指标;RI( $j$ )为第  $j$  个准则对应的判断矩阵的平均随机一致性指标; $\omega(j)$ 为第  $j$  个准则在目标层中的权重, $m$ 为准则层指标的数量。

以 TBM 施工风险评价指标体系中的周边环境 ( $Q_1$ ) 准则层为例, $Q_1$  的指标层由 TBM 下穿既有道路  $U_1$ 、地下管线变形  $U_2$ 、临近建筑物  $U_3$  三个指标组成,应用权重计算辅助程序计算指标层权重,如图 2 所示。



图 2 TBM 施工风险评价  $Q_1$  指标层权重计算  
Fig.2  $Q_1$  index layer weight calculation of TBM construction risk evaluation

准则层指标  $Q_1 = \{U_1, U_2, U_3\}$  对应的权重为  $w = \{0.249 3, 0.593 6, 0.157 1\}$ ,  $CR = 0.052 1 < 0.1$ , 满足一致性检验要求,权重从大到小排序:地下管

5 取值。解判断矩阵的特征方程,可得其最大特征值  $\lambda_{max}$ 。各层的单排序权重,即为  $\lambda_{max}$  所对应的特征向量经归一化处理后得到的结果。

线变形  $U_2 >$  TBM 下穿既有道路  $U_1 >$  临近建筑物  $U_3$ 。该结果明确了在“周边环境”准则下,各风险因素的优先管理次序。

同理,计算各准则层对应的指标层指标权重,进而计算各指标层指标相对于目标层的组合权重(即层次总排序权重),计算结果如图 3 所示。



图 3 TBM 施工安全风险评价层次总排序权重计算  
Fig.3 Calculation of total ranking weight of TBM construction safety risk evaluation level

由图 3 可知  $CR = 0.0469 < 0.1$ , 满足一致性检验的要求。按照层次总排序权重由大到小进行排序:岩石单轴抗压强度  $U_4 >$  地下水突涌  $U_6 >$  隧道渗水  $U_9 >$  岩体完整性系数  $U_5 >$  地下管线变形  $U_2 >$  施工管理水平  $U_{12} >$  隧道埋深  $U_{13} >$  岩爆  $U_7 >$  刀盘贯入度  $U_{15} >$  TBM 下穿既有道路  $U_1 >$  断层破碎带  $U_8 >$  刀具直径  $U_{19} >$  临近建筑物  $U_3 >$  隧道塌方  $U_{10} >$  TBM 直径  $U_{20} >$  岩层断裂  $U_{11} >$  系统通风量  $U_{14} >$  刀盘转速  $U_{17} >$  装机总功率  $U_{18} >$  注浆压力  $U_{16}$ 。该结果明确了 TBM 风险评价指标体系中所有风险因素的优先管理次序。

### 3 复杂地质条件下 TBM 施工风险评价系统开发

基于构建的以复杂地质条件下 TBM 施工风险评价指标体系、指标权重和隶属函数为核心的 TBM 施工风险模糊评价模型,应用基于 Java 语言的 Eclipse 平台,开发了一套复杂地质条件下 TBM 施工安全风险评价系统。该系统本质上是一个集

成了模糊数学理论的专家系统,其作用在于将领域专家的知识 and 经验程序化,以实现智能化的风险推理与评价支持<sup>[31-33]</sup>,对 TBM 施工风险进行风险等级评估。如图 4 所示,该评价系统由六大子模块构成,其中评价子模块、数据管理子模块和辅助功能子模块为核心功能模块;系统维护子模块、窗口子模块和帮助子模块为通用功能模块。评价流程如图 5 所示。

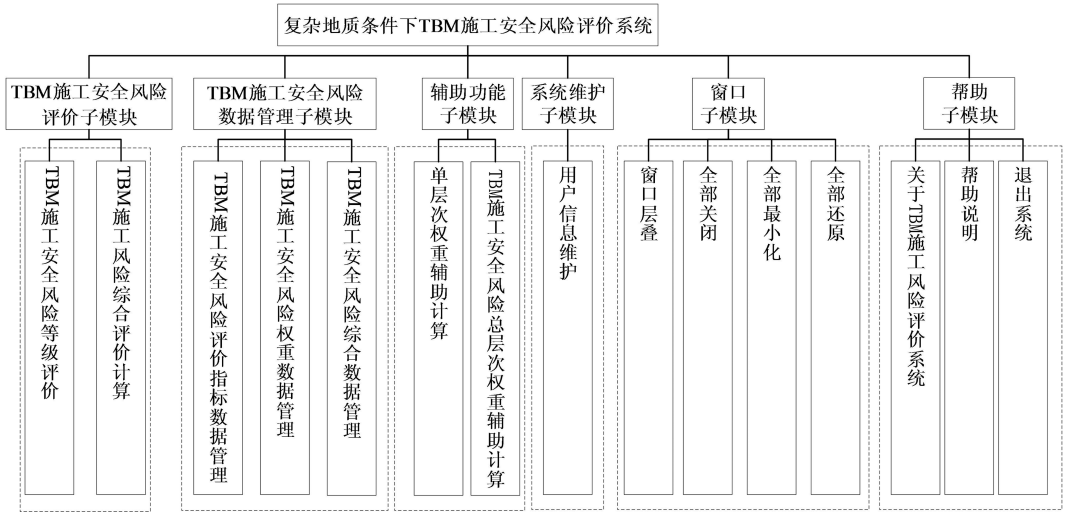


图 4 TBM 施工风险评价系统模块功能图

Fig.4 Module function diagram of TBM construction risk evaluation system

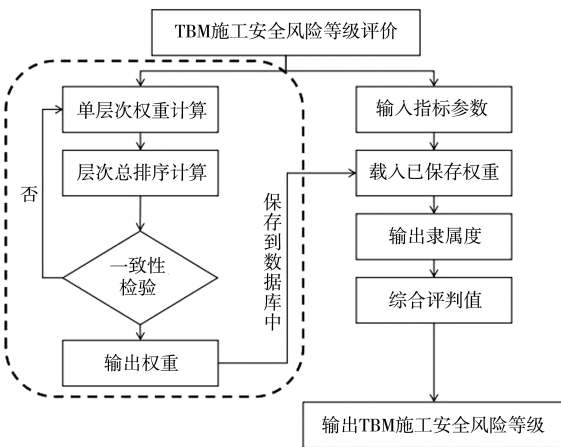


图 5 系统评价流程图

Fig.5 System evaluation flowchart

依据《城市轨道交通工程地质风险控制技术指南》<sup>[34]</sup>和《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB 50652-2011)<sup>[35]</sup>,将 TBM 施工风险划分为四个等级(极高风险、高风险、中风险和低风险),风险等级数值越高表示风险程度越低,反之则代表风险程度越高。

对 TBM 施工工程进行分段评价时,不同施工段的评价结果可能不同,风险等级也有差别。为了对整个 TBM 施工工程进行 TBM 施工安全风险评价,采用加权平均法,将各分段评价结果集成为一个综合评价值  $\bar{D}$ :

$$\bar{D} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n D_i L_i \quad (11)$$

式中: $L_i$  为 TBM 施工工程第  $i$  区段长度, $D_i$  为 TBM 施工工程第  $i$  区段的施工风险评价值, $L$  为 TBM 施工工程总长度。

TBM 施工风险等级可依据  $\bar{D}$  判定:极高风险 ( $0 \leq \bar{D} < 0.3$ );高风险 ( $0.3 \leq \bar{D} < 0.5$ );中度风险 ( $0.5 \leq \bar{D} < 0.7$ );低风险 ( $0.7 \leq \bar{D} < 1.0$ )。

TBM 施工安全风险评价系统主界面为用户提供了 TBM 施工安全风险评价的核心功能。用户可通过“风险等级评价”或“综合评价计算”模块,输入参数并获取即时的风险评价值与等级。其中,将权重计算流程程序化,集成为一个独立的“辅助功能”模块(如图 6 所示),为用户完成判断

矩阵构建、权重计算及一致性检验提供专用工具,有效提升了指标权重确定的效率与规范性。



图 6 辅助计算菜单界面

Fig.6 Auxiliary calculation menu interface

### 4 TBM 施工安全风险评价系统的工程案例

以云南高黎贡山隧道工程出口段的 TBM 施工工程为例验证研发的 TBM 施工安全风险评价系统的可行性与有效性。

#### 4.1 工程概况

高黎贡山隧道是中国最长的铁路长隧,全长 34 531 m,其中出口段长 13 260 m,隧道最大埋深

1 155 m。隧道地处喜马拉雅地震带,地质环境复杂,表现为典型的“三高四活跃”特征,即高地温、高地应力、高地震烈度,以及活跃的地质构造运动、活跃的岸坡浅表改造过程、活跃的外动力地质作用和活跃的地下水。不良地质条件主要表现为岩层断裂、围岩失稳、突涌水、断层破碎带、岩爆等,该隧道集成了 TBM 施工中常见的地质灾害风险,是检验风险评价系统适应性与有效性的理想案例。高黎贡山隧道出口段的地质纵断面图如图 7 所示,其不良地质地段主要是四段宽度为 50 m 的断层破碎带和两段长达 140 m 的蚀变岩带。

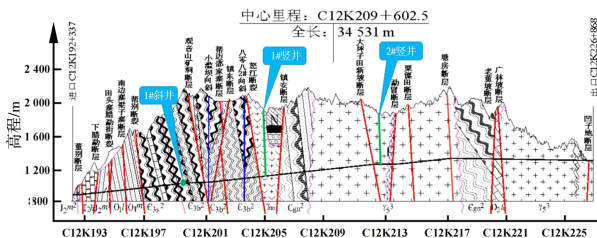


图 7 云南高黎贡山隧道地质纵断面图

Fig.7 Geological profile of Yunnan Gaoligongshan Tunnel

#### 4.2 云南高黎贡山隧道工程分段评价计算

根据地质条件差异,将云南高黎贡山隧道出口段划分为 15 段,进行分段评价。

根据施工现场实测数据为分段评价指标赋值。如表 6 为 L1 分段的不良地质准则层下 6 个指标层指标的赋值情况。

表 6 云南高黎贡山隧道出口段分段评价指标赋值 ( $U_6-U_{11}$ )

Tab.6 Evaluation index assignment of exit section of Gaoligongshan Tunnel in Yunnan Province ( $U_6-U_{11}$ )

分段	围岩等级	长度/m	评价指标					
			$U_6/m^3 \cdot d^{-1}$	$U_7$	$U_8/m$	$U_9/Lu$	$U_{10}$	$U_{11}$
L1	II	2 160	2 400	4.96	0	0.12	557.5	3.08

将赋值后各分段的评价指标数值输入 TBM 施工安全风险评价系统的指标数据管理库中,启动 TBM 施工安全风险等级评价,可得到各分段 TBM 施工安全风险评价结果,如图 8 为 L<sub>1</sub> 段的 TBM 施工安全风险评价结果。汇总 15 个分段的 TBM 施工安全风险评价结果如表 7 所示。将表 7 的分段长度和评价结果手动输入 TBM 施工安全风险综合评价系统,计算结果如图 9 所示,云南高黎贡山隧道工程的综合风险评价值为 0.738 1,风险等级为低风险。

#### 4.3 风险评价结果分析

云南高黎贡山隧道工程出口段 TBM 施工过程中,通过及时调整 TBM 掘进参数,并依托高水平管理与施工技术,将整体施工风险控制在了较低水平。现场施工报告明确指出,工程掘进过程中未遭遇不可控的重大问题。工程施工的实际风险与 TBM 施工安全风险综合评价系统输出的“低风险”结论一致。结果表明,研发的 TBM 施工安全风险综合评价系统在实际应用中具有可行性,评价结果具有有效性。



图 8 云南高黎贡山隧道工程 L1 分段评价结果

图 9 云南高黎贡山隧道工程综合评价结果

Fig.8 Evaluation results of L1 section of Gaoligongshan Tunnel Project in Yunnan Province

Fig.9 Comprehensive evaluation results of Gaoligongshan Tunnel Project in Yunnan Province

表 7 云南高黎贡山隧道工程 TBM 施工安全风险分段评价结果

Tab.7 Sectional evaluation results of safety risks for TBM construction in Gaoligongshan Tunnel Project in Yunnan

隧道分段	分段长度/m	评价结果
L1	2 160	0.791 2(低风险)
L2	4 190	0.785 2(低风险)
L3	2 840	0.712 2(低风险)
L4	760	0.702 1(低风险)
L5	650	0.660 5(中度风险)
L6	330	0.750 6(低风险)
L7	210	0.702 1(低风险)
L8	1 190	0.795 9(低风险)
L9	90	0.487 8(高风险)
L10	500	0.497 4(高风险)
L11	140	0.483 3(高风险)
L12	50	0.504 5(中度风险)
L13	50	0.507 4(中度风险)
L14	50	0.481 8(中度风险)
L15	50	0.507 8(中度风险)

### 5 结论

1) 构建了专用于复杂地质条件 TBM 施工安全风险评价的指标体系。该体系通过 WBS-RBS 法与因子分析的两步优化,将复杂地质条件下 TBM 施工的风险因素凝练为 20 个关键指标,显著提升了评价的针对性与可操作性。

2) 建立了融合层次分析法与模糊数学的定量评价模型。明确了 TBM 施工安全风险评价指标体系中各指标的权重与隶属函数,并通过自主编写的程序实现了权重计算的规范化与高效化,为风险定量分析提供了可靠工具。

3) 研发的 TBM 施工风险评价系统将评价模型、数据管理与专业计算功能模块化,实现了从数据输入到风险等级输出的程序化运行,形成了完整的 TBM 施工安全风险评价解决方案。

4) 云南高黎贡山隧道工程的实证分析表明,研发的 TBM 施工风险评价系统输出的评价结果与工程实际的风险水平高度吻合,验证了方法、模型及系统的准确性与有效性。

### 参考文献:

[1] 洪开荣,冯欢欢. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2019—2020 年)[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(8): 1259—1280.

[2] 周小松. TBM 法与钻爆法技术经济对比分析[D]. 西安:西安理工大学,2010.

[3] MIRHABIBI A, SOROUSH A. Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29(3): 40—51.

[4] SOUSA R L, EINSTEIN H H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian networks: Porto Metro case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27(1): 86—100.

[5] 尹俊涛,尚彦军,傅冰骏,等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J]. 工程地质学报,2005,13(3):

389-397.

- [6] 陈馈,冯欢欢. TBM 施工风险与应对措施[J]. 隧道建设,2013,33(2):91-97.
- [7] 董勇. TBM 在重庆地铁施工中的风险分析及安全管理[J]. 都市轨道交通,2013,26(3):107-111.
- [8] 王晓磊. 深圳地铁 A 项目施工安全风险识别与分析[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [9] 詹金武. 基于人工智能的 TBM 选型及掘进适应性评价方法与决策支持系统[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [10] 詹金武,李涛,李超. 基于人工智能的 TBM 选型适应性评价决策支持系统[J]. 煤炭学报,2019,44(10):3258-3271.
- [11] 任艳超. 地铁大跨隧道下穿既有城市道路隧道施工风险评估及控制[J]. 建筑结构,2021,51(S2):1741-1747.
- [12] 姜畔. 填海区 TBM 穿越不良地层及突水应急措施研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(12):83-88.
- [13] 王立峰. 盾构施工对桩基的影响及桩基近邻度划分[J]. 岩土力学,2014,35(S2):319-324.
- [14] 段世委,许仙娥. 岩体完整性系数确定及应用中的几个问题探讨[J]. 工程地质学报,2013,21(4):548-553.
- [15] 资西阳. 断层破碎带隧道突涌水灾害风险等级评价研究[J]. 公路,2021,66(12):410-416.
- [16] 田睿,孟海东,陈世江,等. 基于深度神经网络的岩爆烈度分级预测[J]. 煤炭学报,2020,45(S1):191-201.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水利水电工程地质勘察规范(2022年版):GB 50287—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2022.
- [18] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [19] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范(2024年局部修订):TB 10003—2016[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [20] 黄兴,刘泉声,刘滨,等. TBM 围岩挤压大变形特性分析与等级划分[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(2):260-266.
- [21] HOEK E,GUEVARA R. Overcoming squeezing in the yacambú-quibor tunnel,Venezuela[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2009,42(2):389-418.
- [22] 侯义辉,陈航,袁霏龙,等. 谈山岭隧道施工班组标准化管理的意义[J]. 交通企业管理,2020,35(6):58-59.
- [23] BENARDOS A G,KALIAMPAKOS D C. A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling; illustrated by the Athens Metro,Greece[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2004,41(6):987-999.
- [24] 吴波. 隧道施工安全风险管理研究与实务[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [25] 孙洪凯,祁海燕,潘旭,等. TBM 在隧洞不良地质条件下的施工技术[J]. 水利规划与设计,2015(6):78-79,82.
- [26] 秦鹏飞,王为林,袁媛. 岩土工程注浆技术与其应用研究[J]. 地质与勘探,2021,57(3):631-639.
- [27] 马若龙,姜文龙,吕阿谈,等. 管片壁后灌浆质量无损检测新技术研究及应用[J]. 人民黄河,2021,43(8):139-143.
- [28] 谭忠盛,周振梁,李宗林,等. 高强度围岩隧洞 TBM 刀具磨损规律研究[J]. 土木工程学报,2021,54(12):104-115.
- [29] 张信龙,刘庆东,隋伟宁,等. 基于模糊数学理论的装配式超低能耗建筑外围护墙板方案评价研究[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(3):69-73.
- [30] 姬新元,王红亮,徐小龙,等. 基于模糊数学理论的储层评价:以鄂尔多斯盆地富黄地区延长组长 9 油层为例[J]. 科学技术与工程,2019,19(20):49-55.
- [31] 王龙源. 基于模糊数学理论的桥梁工程质量评价研究:以宁都北跨线桥为例[D]. 南昌:南昌大学,2019.
- [32] 李海凌,宋吉荣. 层次分析法在工程项目风险评价中的应用研究[J]. 四川建筑,2004,24(1):87-88,90.
- [33] 王玉怀,潘德祥,李祥仪. 应用层次分析法及模糊评价进行煤矿安全评价研究[J]. 煤炭工程,2005,37(3):60-62.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程地质风险控制技术指南[S]. 建设工程文件归档规范,2020,9.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范:GB 50652-2011[S]. 北京:中国计划出版社,2011.

(责任编辑:马晓磊)