

基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法

张世殊¹, 王 鹏², 张 开^{1,3}, 肖华波¹, 薛翊国³, 陈炜韬¹, 冉从彦¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130; 2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061;

3. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 现有的超前地质预报考虑了多方面信息的融合, 但仍存在地质信息参与少、融合信息来源不全面等问题。提出一种基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法, 筛选并建立包含 7 大类信息、232 项指标的工程施工全过程信息指标体系和有针对性的不良地质问题指标体系, 提出定量指标分段函数、半定性指标节点插值以及定性指标阈值分级相融合的 $ITV-IRV$ (指标测试值 - 指标风险值)映射转换方法和数据融合指标区段划分方法, 最后利用层次分析法和 Huber 加权法进行权重分析, 利用模糊融合理论等进行数据融合计算, 获得不良地质问题风险指数。研究表明: (1) 全过程信息指标库和不良地质问题指标体系能够提供全面的超前地质预报指标参数; (2) $ITV-IRV$ 映射转换方法, 指标融合计算区段划分方法和指标权重分析方法, 能够归一化各指标数据、实现融合前数据准备; (3) 基于数学地质逻辑、模糊融合理论等多种融合方法相结合的多源数据融合运算, 能够准确和有效获取不良地质问题风险指数。(4) 工程应用表明, 本文提出的超前地质预报方法能够提高预报准确性、增强预报全面性、提升预报效率, 有效指导施工。

关键词: 隧道工程; 超前地质预报; 全过程信息; 数学地质逻辑; 多源数据融合

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2025)04 - 0838 - 12

An advanced geological forecast method of tunnels based on multi-source data fusion of full-process information

ZHANG Shishu¹, WANG Peng², ZHANG Kai^{1,3}, XIAO Huabo¹, XUE Yiguo³, CHEN Weitao¹,
RAN Congyan¹

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 3. School of Engineering and Technology, China University of Geophysics(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The existing advanced geological forecast methods consider the integration of multiple source information, but still face issues such as limited participation of geological information and incomplete sources of integrated data. This study proposes a multi-source data fusion method for tunnel advanced geological forecast based on the full-process construction information. It screens and establishes a full-process indicator system, containing

收稿日期: 2024 - 10 - 08; **修回日期:** 2024 - 11 - 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20601); 国家自然科学基金重大项目(42293351); 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-HXGG - 2023 - 13)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. U22A20601), Major Program of the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 42293351) and Science and Technology Project of Power Construction Corporation of China(Grant No. DJ-HXGG - 2023 - 13)

作者简介: 张世殊(1970 -), 男, 2014 年于四川大学岩土工程专业获博士学位, 现任正高级工程师, 主要从事水电工程勘察及工程地质信息化一体化等方面的研究工作。E-mail: 1992070@chidi.com.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0768

7 major categories and 232 indicators, and a targeted unfavorable geological problem indicator system. Besides, A mapping conversion method of *ITV-IRV* (indicator test value and indicator risk value), which combine quantitative indicator segment functions, semi-qualitative indicator node interpolation, and qualitative indicator threshold classification, is proposed, as well as a data area segmentation method. Finally, Analytic Hierarchy Process and Huber Weighting method are used for weight analysis. Fuzzy Fusion Theory and so on methods are applied for data fusion and obtaining the risk probabilities of unfavorable geological problems. The results show that: (1) The full-process indicator system and unfavorable geological problem indicator system provide comprehensive advanced geological forecast indicators. (2) The *ITV-IRV* mapping conversion method, data area segmentation method and indicator weight analysis methods, enable data normalized across indicators and be ready for multi-source data fusion. (3) The multi-source data fusion operation, combining mathematical geological logic, Fuzzy Fusion Theory, and other fusion methods, can accurately and effectively obtain the risk probabilities of unfavorable geological problems. (4) Engineering applications demonstrate that the proposed advanced geological forecast method improves forecasting accuracy, enhances comprehensiveness, increases efficiency and effectively guides construction.

Key words: tunnel engineering; advanced geological forecast; full-process information; mathematical geological logic; multi-source data fusion method

1 引言

超前地质预报是根据现场条件, 采用地质分析、超前地质钻探、地球物理探测、超前导洞等一种或多种手段, 对工作面前方地质情况进行多尺度、多参数预报的方法。经过 40 余年的发展, 国内外隧道超前地质预报理论技术与工程应用都取得了重要进展, 对隧道施工安全控制和防灾减灾起到了重要作用。

隧道超前地质预报已经由起初的超前导坑、超前钻探等方法发展到地震波法、电法、电磁法等地球物理探测方法。由于物探的多解性, 单一预报方法对地质预报的准确度并不十分可靠。为了提高预报的准确性, 许多研究者致力于多种方法相结合的综合预报方法研究。曲海锋等^[1]以地面地质调查法、地质雷达、弹性波反射法 3 种超前地质预报技术为手段, 基于系统论的观点建立了综合超前预报方法。李术才等^[2]总结了岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报中存在的主要问题, 提出了岩溶裂隙水和不良地质体综合超前地质预报方法。李天斌等^[3]介绍了地质雷达法、瞬变电磁法和地震波法在复杂地质条件下隧道的超前地质预报应用, 提出了综合物探与地质分析结合的综合预报模型, 有效指导施工。因此, 多手段结合的综合预报方法能有效解决单一手段预报精度低、适用范围有限的缺点, 使针对不良地质体的预报准确率和精度大大提高。

在对多种方法数据进行综合分析解译时, 传统

的方式主要依靠主观经验^[4], 为了进一步提高超前综合地质预报的精度, 学者们对多源数据融合技术开展了相关研究, 并取得一定成果。刘斌等^[5]将其中一类方法的探测结果转化为数学约束施加到另一类数据的反演方程中, 提出了空间结构约束联合反演方法。徐善初等^[6]从 6 种常用预报方法出发建立了岩溶隧道地质预报模糊综合预测模型。李术才等^[7]将 BP 神经网络数学方法应用于深长隧道涌水量预测中, 建立了基于多参数融合的深长隧道突水突泥综合预测理论。张平等^[8]采用基于证据关联系数的加权融合技术, 建立了基于强度理论的岩爆可能性判定方法和基于能量理论的岩爆烈度预测方法。相关研究验证了多源数据融合技术的合理性和有效性。

然而, 现有的隧道综合超前地质预报大多以物探信息为主、地质信息为辅, 当洞室环境因素干扰大、区域地质条件复杂、不良地质问题频发时, 其物探信息精度容易出现较大偏差。同时, 现有多源数据融合方法考虑的信息来源较少, 未充分考虑基本地质条件信息、超前物探信息、开挖掘进施工参数信息等隧道开挖全过程信息的输入。

为了解决上述问题, 本文提出了基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法。首先以地质信息为核心, 囊括基本地质条件、超前物探、开挖掘进施工参数等隧道开挖全过程信息资料, 确立了一套隧道工程全过程信息指标库, 并针对各不良地质问题筛选建立不同的不良地质问题指标体系; 其次确立了各指标的指标值-风险值的归一化计算方法, 统一各数据格式, 为多源数据融合奠定

数据基础；最后在区段划分和权重分析方法基础上，引入信息化技术，运用数学地质理论，开展多源数据的矩阵融合计算，获得不良地质问题风险指数，实现多源数据融合的综合预报。

2 全过程信息的指标筛选

2.1 全过程信息指标库

在隧道超前综合预报中，刘树才^[9]在实践中形成了“以矿井直流电法勘探为主，辅以矿井高分辨率地震勘探、无线电波透视、井下微重力测量、放射性测量和红外测温等技术”的综合物探技术体系，在调查矿井水补给源、导水通道等方面取得了较好的应用效果。底青云等^[10]提出了以可控源音频大地电磁法为主，甚低频法、激发极化法和瞬变电磁法为辅的地球物理综合勘探技术，为施工提供了可靠的参考。

为了更全面地开展超前地质预报工作，本文在理解灾害机制和影响因素的基础上，从前期的设计勘探、到开挖期的掘进测试，梳理了基本设计、基本地质条件、超前勘探(孔、洞、井)、超前物探、开挖掘进施工参数、试验与测试以及监测与检测共 7 大类全过程信息，建立了全过程信息指标库，总结提炼出了 232 项超前地质预报核心指标，实现了由散点信息到全过程信息、由模糊因素到清晰指标的转变。

具体来讲，在基本设计信息中，选取洞型形态、跨度、高度、开挖形式和围岩等级等指标(见表 1)；在基本地质条件信息中，选取地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水、掌子面评价五小类信息，包括地貌特征、垂直埋深、地层代号、岩性、饱和系数、岩体完整性、地下水压力、抗剪强度等指标；超前勘探(孔、洞、井)信息中，选取超前钻孔、超前探洞、超前探井三小类信息，包括反水量、反水颜色、岩溶洞穴情况等指标；超前物探信息中，选取地震波法、地质雷达法、瞬变电磁法、激发极化法等小类信息，包括纵波波速、泊松比、电阻率、极化率等指标；开挖掘进施工参数信息中，选取钻爆法施工记录、TBM(隧道掘进机)法施工记录、岩渣记录三小类信息，包括开挖进尺、刀盘推力、岩渣尺寸等指标；试验与测试信息中，选取岩石试验与测试、土试验与测试、水试验与测试三小类信息，包括岩石矿物主要成分、岩石磨片描述等指标；监测与检测信息中，选取微震监测、变形监测、放射性检测等信息，包括矩震级、沉降、氡浓度等指标。

表 1 基本设计信息指标
Table 1 Basic information indicators

单条、分段				
洞型形态/ 描述	跨度/ 定量	高度/ 定量	开挖形式/描述	围岩等级/ 描述
马蹄形/ 圆形/方形/ 拱形	单位: m	单位: m	全断面法/台阶法/环 形开挖留核心土法/ 中隔壁法(CD 法)/交 叉中隔壁法(CRD 法)/TBM 法	I 级/II 级/III 级/ IV 级/V 级

2.2 不良地质问题指标体系

隧道开挖时，常见的不良地质问题有岩爆、大变形、岩溶溶洞、突水涌泥、塌方、高地温热害、有毒有害气体危害以及放射性危害等，根据不良地质条件的不同，又细分为高地应力岩爆、高地应力大变形、岩溶溶洞、岩溶突水涌泥、断层破碎带塌方、断层破碎带突水涌泥、软弱岩带大变形、软弱岩带塌方、高地温热害、有毒有害气体危害以及放射性危害等。不同不良地质问题需要选用的指标存在差异。

笔者在现场试验以及专家成熟经验的基础上，对各不良地质问题进行分析，从全过程信息指标库中进行筛选，确立了单独针对各不良地质问题的指标体系。限于篇幅，仅以断层破碎带塌方为例，展示不良地质问题的指标体系组成(部分指标)。

塌方是指围岩失稳而造成的突发性坍塌、堆塌、崩塌等破坏性地质灾害。隧道开挖前，岩体处于一定的应力平衡状态，工程开挖会使隧道周围岩体发生应力重分布。当隧道穿越断层破碎带、软弱岩带等围岩强度低、稳定性差的区域时，开挖后的围岩不能适应重分布应力的变化，就会向洞内发生变形和失稳，最终造成塌方。

G. Q. Xue 等^[11]选取纵波速度、开挖跨度、埋深、地下水、周围环境和施工致灾因素来构建隧道塌方风险预测指标体系。杨建辉等^[12]对穿越富水断层破碎带隧道塌方案例的机制分析与预防进行研究，并选取断层破碎带、地下水、支护参数及施工影响为致灾因子对塌方进行分析。根据已有研究经验，断层破碎带塌方受断层破碎带规模、岩体结构、开挖跨度、埋深、降雨及地下水的影响较大，断层及破碎带宽度越大、岩体结构越松散、开挖跨度越大、埋深越大、降雨及地下水越多，越容易造成断层及破碎带塌方。在断层破碎带塌方指标体系中(见图 1)，本文主要选取地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水、掌子面评价、超前钻孔、地震波法、

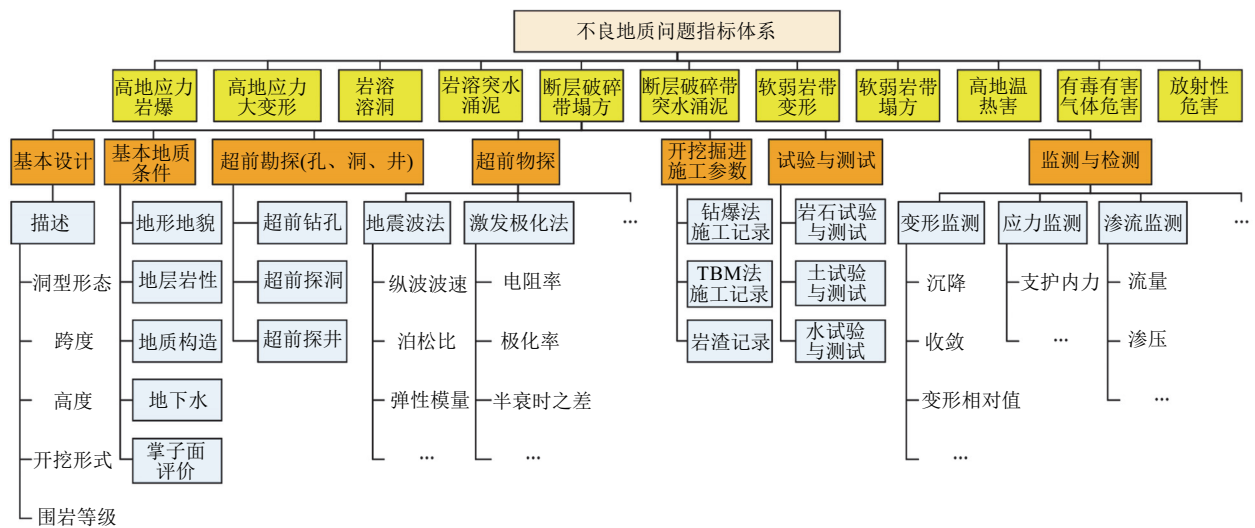


图 1 断层破碎带塌方指标体系(部分指标)
Fig.1 Fault fracture zone indicator system(partial indicators)

激发极化法、TBM 法施工记录、水现场试验与测试、变形监测、应力监测、渗流检测等信息，包括洞型形态、转速、纵波波速、电阻率、沉降、支护内力、流量等指标。

3 指标风险值的计算

不同指标的量化形式和数据范围存在不同，无法直接进行对比和数据融合。为了解决该问题，本文结合专家经验分析与案例统计结论，根据各指标的实际地质意义，提出了“指标测试值 - 指标风险值”的映射转换方法，将指标测试值转化为范围是 0~1 的归一化无量纲指标风险值，表征单一指标影响下的不良地质问题由低到高的发生概率，实现各指标量化形式和数据范围的一致性。

3.1 定量指标的分段函数映射转换

对于泊松比、纵波波速等定量数据，其具有较为明确的上下限数值，且中间数值连续，可以通过映射分段、建立映射函数、确定常参数取值的方式确定指标风险值，具体步骤如下：

(1) 确立指标测试值的上下限及其与指标风险值的相关关系。以泊松比为例，其上下限范围是 0~0.5，与指标风险值(0~1)是正相关关系，令指标测试值 0 ≡ 指标风险值 0，指标测试值 0.5 ≡ 指标风险值 1。

(2) 进行指标测试值的映射分段。考虑到不同的地质条件(如岩性)下，围岩特性(如强度、完整性、含水性等)的指标测试值和指标风险之间并不完全

是单调相关，如硬岩的泊松比<软岩的泊松比，但硬岩和软岩地层都可能会发生塌方等不良地质问题。因此应根据不同地层情况进行特异性和分段描述，如页岩的泊松比一般为 0.10~0.20，可以令指标测试值 0.10≡ 指标风险值 0.2，指标测试值 0.20≡ 指标风险值 0.7，则指标测试值分为 0~0.10, 0.10~0.20, 0.20~0.50 三个区间，分别建立映射关系(见表 2)。

表 2 页岩地层泊松比的指标测试值 - 风险值映射分段
Table 2 Area segmentation of Poisson's ratio for $ITV-IRV$ conversion in shale formations

指标区间	测试值	风险值
区间 1	0~0.10	0~0.2
区间 2	0.10~0.20	0.2~0.7
区间 3	0.20~0.50	0.7~1.0

(3) 建立指标测试值和指标风险值的映射函数。一般选择 3 种常见的关系式模型，即直线型、指数型和 S 型。

直线型：

$$y_i = ax_i + b \tag{1}$$

指数型：

$$y_i = ae^{bx_i} + c \tag{2}$$

S 型：

$$y_i = \frac{a}{1 + e^{b(x_i - c)}} \tag{3}$$

式中: y_i 为指标的风险值; x_i 为指标的测试值; a , b , c 均为常参数, 需要通过数据拟合确定。直线型关系式通常适用于简单线性关系, 即随着某个参数值的增加, 指标值呈线性增长或下降; 指数型关系式适用于那些参数值与指标值之间呈现指数增长或衰减的关系, 通常用于描述非线性增长或衰减的现象; S 型关系式通常用于描述渐近性增长的关系, 即随着参数值的增加, 指标值先快速增加, 随后趋于平稳。

确定映射函数中的常参数取值, 常参数 a , b , c 决定了拟合函数的具体形态及其对数据的描述能力。可以通过 2 种主要方法来处理这些常参数的确定:

一种是对掌子面的情况进行分析和判断, 参考掌子面处的指标测试值和地质条件、确定掌子面处指标测试值对应的指标风险值, 结合区间上下限约束, 计算常参数值。

另一种是根据数理统计结果, 在某类地质条件下的样本数据积累到足够多时, 可以利用这些数据进行数据拟合, 建立更符合实际的指标赋值函数。数据拟合时可以采用最小二乘法等优化算法进行拟合。最小二乘法是最常用的基础算法, 其核心思想是找到一条曲线, 使得所有数据点到该曲线的垂直距离的平方和最小化。具体来说, 对于一组数据点 (x_i, y_i) 和一个待拟合的函数模型 $f(x)$, 最小二乘法通过最小化以下目标函数来找到最优参数:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4)$$

式中: S 为平方误差和, $f(x_i)$ 为模型的预测值。通过对参数进行求导并设置导数为 0, 可以得到最小化 S 的参数值, 这些参数值使得拟合曲线与数据点之间的误差最小。

3.2 半定性指标的节点插值映射转换

对于地下水、完整性等半定性数据, 其兼具明确的数据区间描述和模糊的分段定性描述, 如地下水指标, 根据相关规范^[13], 水量 $<25 \text{ L}/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$ 为干燥到渗水、滴水, 水量 $25 \sim 125 \text{ L}/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$ 为线状流水, 水量 $>125 \text{ L}/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$ 为涌水。在实际工程中, 这类指标往往无法获取准确的数据值, 可以先根据分段定性描述建立指标值分区节点, 再采用节点间插值的方式确定指标风险值, 具体步骤如下:

(1) 确立指标测试值的上下限及其与指标风险

值的相关关系。以地下水指标为例, 其上下限范围是干燥~涌水, 与指标风险值(0~1)是正相关关系, 令指标测试值干燥 = 指标风险值 0, 指标测试值涌水 = 指标风险值 1。

(2) 进行指标测试值的映射分段。根据分段定性描述, 直接进行指标测试值的节点分段。可以进行均匀分段或不均匀分段。以地下水指标为例, 可以令指标测试值干燥到渗水、滴水 = 指标风险值 0~0.3, 指标测试值线状流水 = 指标风险值 0.3~0.7, 指标测试值涌水 = 指标风险值 0.7~1.0, 建立映射关系(见表 3)。

表 3 地下水的指标测试值 - 风险值映射分段

Table 3 Area segmentation of water for $ITV-IRV$ conversion

指标	测试值	风险值
区间 1	水量 $<25 \text{ L}/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$, 干燥到渗水、滴水	0~0.3
区间 2	水量 $25 \sim 125 \text{ L}/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$, 线状流水	0.3~0.7
区间 3	水量 $>125 \text{ L}/(\text{min} \cdot 10 \text{ m})$, 涌水	0.7~1.0

(3) 根据实际地质情况, 在区间内判断、选取某里程指标测试值对应的指标风险值插值。

(4) 根据数理统计结果, 在某类地质条件下的样本数据积累到足够多时, 可以利用这些数据进行数据分析或拟合, 建立更符合实际的指标风险值映射取值。

3.3 定性指标的域值分级映射转换

对于地质雷达的频率变化、相位一致性等定性数据, 其结果通常只有图片或文字解释, 无具体的定量参数, 可以直接根据其定性性质提出给定的指标风险值, 具体步骤如下:

(1) 进行指标测试值的映射分段。根据定性描述, 将指标风险值分为对应区段。如地质雷达的相位一致性描述有同相轴错断明显、同相轴略有错断、同相轴基本连续 3 条, 则指标风险值分为 3 段。

(2) 根据实际地质情况, 判断、选取指标风险值区段的具体风险取值。如表 4 所示, 地质雷达的振幅强度描述有增强明显、略有增强、无变化, 分别取指标风险值为 0.6, 0.4 和 0.1; 地质雷达的频率变化描述有变化明显且波形杂乱、略有变化、无变化, 分别取指标风险值为 0.6, 0.4 和 0.1; 地质雷达的相位一致性描述有同相轴错断明显、同相轴略有错断、同相轴基本连续, 分别取指标风险值为 0.5, 0.3 和 0.1。

表 4 地质雷达的指标测试值 - 风险值映射转换
Table 4 Ground penetrating radar $ITV-IRV$ conversion

指标名称	指标测试值描述	指标风险值
振幅强度	增强明显	0.6
	略有增强	0.4
	无变化	0.1
频率变化	变化明显且波形杂乱	0.6
	略有变化	0.4
	无变化	0.1
相位一致性	同相轴错断明显	0.5
	同相轴略有错断	0.3
	同相轴基本连续	0.1

(3) 对上述步骤的指标风险值的取值进行统计学调整。上述步骤的指标风险值的取值具有主观性, 根据数理统计结果, 在某类地质条件下的样本数据积累到足够多时, 可以利用这些数据进行数据分析, 建立更符合实际的指标风险值的映射取值。

4 多源数据的融合分析

本文基于数学地质逻辑, 采用非线性算法对多源数据进行融合计算, 建立一种可结合多种数据源和数学方法的预测模型。与传统的超前地质预报方法相比, 非线性算法数据融合模型可以更全面地汇总各类预报数据的有效信息, 降低地质预报的复杂性和不确定性, 从而获得更为准确的结果。

4.1 指标融合计算区段划分

在实际预报中, 不同指标的最大预报距离存在差异, 同一指标的不同区段其风险值也不尽相同。为了保证数据融合时同一区段各指标自身取值的一致性, 有必要建立指标融合计算区段划分原则, 为多源数据融合打下基础。

如图 2 所示, 指标 A 和 B 具有的不同预报范围, 随着掘进方向的推进, 其实际参数值(如波速值)

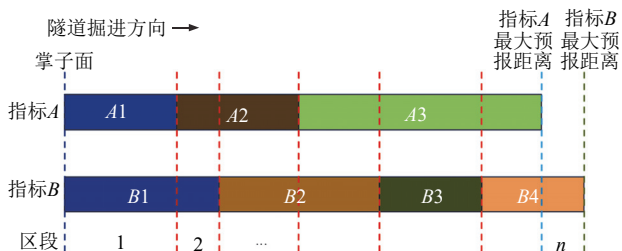


图 2 指标融合计算区段划分示意图

Fig.2 Area segmentation for indicator fusion calculation

也会发生变化。按照以下步骤进行指标融合计算区段划分:

(1) 对任一不良地质问题中涉及的各指标进行合理划分。根据各指标的风险值变化, 将指标 A 的预报范围划分为 $A1, A2, A3$, 指标 B 的预报范围划分为 $B1, B2, B3, B4$, 其中 $A1$ 区段其指标 A 取值相同, $A2, A3, B1, B2, B3, B4$ 同理。

(2) 从起点开始, 并行查询多个划分好的指标。

(3) 当某一指标中的风险值发生变化或到达有效覆盖范围的端点时, 标记该位置为断点(如图 2 中从左侧起的第一条红线和从右侧起的第二条红线), 划分出第一个区段 1, 并依次类推划分出区段 2~ n 。

(4) 遍历每个指标的有效覆盖范围, 直至完整并行遍历所有指标。

依据上述划分原则, 将每一个不良地质问题指标体系进行区段划分, 得到多个多源数据指标融合计算区段。

4.2 指标权重分析

不同指标的物理意义存在显著差异, 使得不同指标针对同一不良地质问题的敏感性不同、同一指标针对不同不良地质问题的敏感性也不同。在分析时, 不能将所有相关指标直接堆叠进行数据融合, 应先分别明确各指标对各不良地质问题的权重, 使各指标在实际融合计算中产生对融合结果的影响性差异。

在实际开挖过程中, 围岩掌子面位置不断变化, 可获取的预报指标也随之动态改变, 传统的主观赋权法难以适应实际动态变化的指标体系并产生随之变化的指标权重结果。因此, 本文采用层次分析法及 Huber 加权法结合的方法计算指标权重, 两方法均可以随输入的风险值以及指标重要度等级动态变化。两方法中, 层次分析法考虑了主观性对指标重要程度的赋予, 而 Huber 加权法则聚焦于数据集本身的离散程度等性质, 因此两方法结合可实现互补作用, 进一步提高最终指标权重的精确性与科学性。

(1) 层次分析法

指标权重的确定是风险评估体系的重要环节, 客观、准确的指标权重是风险评估结果准确性和可靠性的基础。层次分析法(AHP)^[14]可充分考虑指标体系内任意 2 个指标的权重对比关系, 具有系统、灵活、简洁的优点。

① 将各项指标两两对比, 并引用数字 1~9 及其倒数作为标度进而确定判断矩阵 $D = (d_{ij})_{n \times n}$, 其

中, n 为指标的个数。

在确定各指标权重时, 应遵循以地质信息和钻探等直接信息为基础, 以地球物理探测及试验结果等间接信息为补充的原则。地球物理探测^[15]、传感器监测^[16]以及模拟试验^[17]等方法虽然具备无损勘探、效率高等优势, 但其对比地质素描和超前钻探结果则不够直观, 因此, 在充分考虑不同预报方法对于各类不良地质问题的敏感性和精确性的同时, 应确保以地质勘察及钻孔结果为数据融合计算的先决条件, 从而使各指标权重更具针对性。

② 为减少因标度主观赋值对最终结果的影响, 对判断矩阵进行一致性检验。

③ 考虑到 AHP 法具有一定的主观性, 将 AHP 常用的 4 种权重计算方法(几何平均法、算术平均法、特征向量法及最小二乘法)所得指标权重取平均值, 以减少由于标度赋值的主观性造成的结果偏差。归一化后获得指标体系第 i 个指标的最终权重 $w'_i (i = 1 \sim n)$ 。

(2) Huber 加权法

正常情况下, 在对同一位置的同一不良地质问题进行多指标分析时, 指标体系内的各项指标应趋向于表征出相似的不良地质响应程度。然而, 在实际条件中, 由于现场干扰、人员操作以及数据解译等多方面的影响, 各项指标的精度难以统一, 因而会不可避免地出现误差较大的风险值。本文引入 Huber 加权法, 查找可以被视为离群值的指标, 削弱离群值的权重, 以降低离群值对权重向量分析结果的干扰, 提高预报精度。

Huber 加权法^[18]定义了一个阈值 δ (通常用标准差来估计), 利用 Huber 函数和加权平均的方法保留对异常值的某种程度的敏感性, 但又不至于过度受其影响。具体做法如下:

① 用加权平均法计算不良地质问题的风险指数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i w'_i)}{\sum_{i=1}^n w'_i} \quad (5)$$

式中: r 为不良地质问题风险指数, w'_i 为相应的权重值;

② 计算每个风险值的残差 $\Delta r_i = y_i w'_i - r$;

③ 对每个风险值的权重值进行调整。当 $|\Delta r_i| \leq \delta$ 时基础权重 $h_i = 1$, 在 $|\Delta r_i| > \delta$ 时 $h_i = \delta / |\Delta r_i|$;

④ 获得新归一化权重值 $w_i = h_i w'_i / \sum_{i=1}^n (h_i w'_i)$ 。

4.3 指标矩阵融合运算

随着工程对与预报结果精确性与时效性等方面的要求日益提高, 传统的综合预报方法已难以满足现场的实际需求。针对这一问题, 本文引入多源数据融合的思想, 以各种预报方法为独立指标, 采用加权平均法、模糊融合理论、拉普拉斯融合理论和贝叶斯平均法进行不同里程段各类不良地质问题风险的多源数据综合融合计算, 实现指标体系内部在空间和时间上的互补与冗余信息的优化, 获得对于预报对象的一致性解释。

加权平均法^[19]能够根据数据的重要性赋予其相应的权重, 从而更准确地反映出数据的贡献程度, 当数据呈现不均匀分布时, 加权平均法能够根据数据的分布情况调整权重, 更好地反映数据的总体特征。模糊融合算法^[20]将传统的集合理论中的清晰、确定的集合概念进行了拓展, 使得集合中的元素不再严格符合某种条件, 而是通过隶属度函数来描述其与某个集合的相似程度。拉普拉斯融合^[21]能够突出数据细节, 获得更全面的数据信息。贝叶斯平均法^[22]考虑了每个信息源的权重或可信度, 可以根据信息源的质量或重要性来调整对其的贡献, 从而更准确地融合多个信息源。经测试, 以上方法配合结果一致性较好, 可以达到相互补充的效果。

(1) 加权平均法作为多源数据融合技术的基础之一, 通过赋予不同数据源适当的权重, 将各项地质指标的数据整合在一起, 包括来自地质勘察、超前钻孔、地质雷达及地震勘探等不同数据源的信息, 以建立一个综合的地质条件模型, 获取对应风险指数 r_1 , 其表达式为

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

(2) 模糊融合理论的运用使得处理地质数据中的不确定性和模糊性成为可能, 在隧道工程中, 地质条件的变化常常伴随着不确定性, 模糊融合理论能够将这些模糊的信息进行有效的融合和推理, 以更准确地预测隧道施工中可能遇到的地质问题, 通过模糊运算, 将相关信息归纳联系在一起, 获取对应风险指数 r_2 。通过模糊隶属度函数确定权重向量的方法为:

① 如果指标的权重值 w_i 具有相同的标准差,

则直接将权重值 w_i 作为模糊权重 g_i :

② 如果输入的指标的权重值 w_i 具有不同的标准差, 则利用高斯函数计算模糊权重 g_i :

$$g_i = e^{-(w_i - \mu_i)^2 / (2\sigma_i^2)} \quad (7)$$

式中: μ_i 为权重值 w_i 的均值, σ_i 为权重值 w_i 的标准差。然后进行归一化处理, 确保模糊权重 g_i 之和为 1;

③ 利用风险值 y_i 和模糊权重值 g_i 进行加权平均, 求得 $r_2 = \sum_{i=1}^n (y_i g_i) / \sum_{i=1}^n (g_i)$ 。

(3) 拉普拉斯融合理论进一步优化了多个地质指标的融合过程, 考虑各个指标之间的相关性和权重, 提高了预测模型的精度和可信度, 通过构建拉普拉斯矩阵并采用求和运算, 得到对应风险指数 r_3 。借鉴拉普拉斯融合的基本方式, 实现多指标的融合。该算法的核心在于构建拉普拉斯矩阵, 该矩阵对角线元素为

$$r_{ii} = w_i \sum_{j=1}^n (y_i == y_j) \quad (8)$$

非对角线元素为

$$r_{ij} = -w_i (y_i == y_j) \quad (9)$$

式中: y_j 为第 j 个风险值。 $y_i == y_j$ 用于判别指标的序列标识符是否与当前行的标识符相等, 这个条件判断会生成一个布尔值, 如果第 j 个的风险值与第 i 个的风险值相等, 则为 1, 否则为 0。

最终, 对拉普拉斯矩阵进行求和运算, 即可获得最终结果:

$$r_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{i,j} \quad (10)$$

(4) 贝叶斯平均法则在考虑先验信息的基础上进行融合, 动态地调整预测模型, 以适应不断变化的地质条件, 从而获得对应风险指数 r_4 。

贝叶斯规则的核心是贝叶斯公式:

$$P(\theta | D) = \frac{P(D | \theta)P(\theta)}{P(D)} \quad (11)$$

式中: $P(\theta | D)$ 为参数 θ 在给定数据集 D 的条件下的后验概率; $P(D | \theta)$ 为在给定参数 θ 下观测到数据 D 的概率, 称为似然度; $P(\theta)$ 为参数 θ 的先验概率; $P(D)$ 为数据的边际概率, 也称为证据。

在本文中, 通过给定的指标体系进行后验均值计算的公式为

$$p_i = p_{i-1} + w_i \quad (12)$$

$$m_i = \frac{m_{i-1}p_{i-1} + y_i w_i}{p_i} \quad (13)$$

式中: m_i 为后验均值, p_i 为后验精度, m_{i-1} 为先验均值, p_{i-1} 为先验精度, $m_0 = 0.5$, $p_0 = 1$ 。最终的后验均值即为风险指数, 有 $r_4 = m_n$ 。

(5) 将上述 4 个风险指数采用取平均的方法, 获得最终该区段平均风险指数值 R 为

$$R = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 r_i \quad (14)$$

各区段风险指数值为一个 0~1 间的数值, 当该数值趋近于 0 则表示该区段发生风险的概率越低, 当该数值趋近于 1 则表示该区段发生风险的概率越高。

5 工程应用

5.1 工程地质背景

某隧道主要以混合岩及片麻岩为主, 长英质组分较高, 整体抗风化能力较强, 沿线基岩风化程度普遍较低。根据前期勘察资料, 推断本工程虽无区域性断裂穿越, 但局部发育不同规模的断层, 且受断层影响岩体会出现不同程度的蚀变现象和高岭土化, 岩体强度变低软化。在 TBM 施工时, 会出现与现有雄拉隧道施工时类似的塌方、掉块, 从而引起卡机、撑靴无法正常工作以及稳定器卡死等现象。

在现场掌子面(K0+991)巡视时, 发现 K0+988~K0+990 空腔处地下水流量 0.7 m³/h。主要发育 2 组结构面: ① 顺片麻理 EW/N $\angle$ 65°~75°, 结构面走向与隧道轴向呈中等角度相交(32°); ② SN/W $\angle$ 27°, 结构面走向与隧道轴向呈中等角度相交(58°), 缓倾右壁, 该组裂隙与某断层(N20°W/NE $\angle$ 30°, 断层走向与隧道轴向呈中等角度相交(38°))产状较接近。从顶拱塌空处形态来看, 疑似沿片麻理产状垮塌(视线受阻), 塌落物质以灰白色碎块、碎粒、碎粉为主, 软化泥化。

除塌落物外, 洞壁可见范围内目前未见明显的碎粒、碎粉条带, 灰白色高岭土多充填于裂隙间, 初步判断顶拱空腔处为断层带, 但产状无法确定, 如果结构面②为主要结构面, 那极有可能已进入某断层带内, 与隧道呈中等角度相交(58°), 但目前还未揭示主断带, 主断层产状存在不确定性。

5.2 超前地质预报分析

现场已开展 TRT 弹性波法、CFC 复频电导法、TBM 地震波法、TBM 激发极化法 4 种物探方法, 各物探方法的探测结果存在差异性(见表 5)。

表 5 超前地质预报结果
Table 5 Advanced geological forecast results

预报方法	描述
TRT 弹性波法	(1) K0+997~ K1+028, 地震波反射图谱以蓝色负反射为主, 且地震波速呈下降趋势, 该段围岩为已开挖洞段, 节理裂隙较发育, 局部发育断层, 断层带及其影响带岩体破碎, 且地下水较发育。
	(2) K1+028~ K1+071, 地震波反射图谱以蓝色强反射为主, 且局部错段, 结合地震波速呈下降趋势, 推测该段围岩呈变差趋势, 节理裂隙较发育, 局部仍发育断层, 断层带及其影响带岩体破碎。
	(3) K1+071~K1+091, 地震波反射图谱无明显强反射, 结合地震波速呈上升趋势, 推测该段围岩略呈变好趋势, 节理裂隙较发育, 局部发育软弱结构面或存在软弱夹层, 岩体较破碎
CFC 复频电导法	(1) K1+001~K1+023, 长度 22 m。该段围岩和当前掌子面变化不大; 施工中应密切注意岩体破碎情况变化, 如有必要应及时补充超前钻探或加密物探预报等探测手段, 并及时抽排水。
	(2) K1+023~K1+053, 长度 30 m。该段围岩构造较发育, 完整性和稳定性较差。地下水以基岩裂隙水为主, 水量稍多, 以潮湿~滴水状态为主, 局部地下水汇集可能存在线状流水; 施工中注意因局部岩体破碎引起的掉块或坍塌, 并及时抽排水。
	(3) K1+053~K1+084, 长度 31 m。该段围岩构造发育, 完整性和稳定性差。地下水以基岩裂隙水为主, 水量稍多, 整体以滴水状态为主。在 K1+058~K1+078 间局部构造发育, 局部地下水汇集可能存在线状流水; 施工中应密切注意岩体破碎情况变化, 如有必要应及时补充超前钻探或加密物探预报等探测手段, 并及时抽排水。
	(4) K1+084~K1+111, 长度 27 m。该段围岩构造弱发育, 完整性和稳定性稍好。地下水以基岩裂隙水为主, 水量稍多, 以潮湿~滴水状态为主, 局部地下水汇集可能存在线状流水。施工中注意因局部岩体破碎引起的掉块
TBM 地震波法	(1) K1+005.8~K1+040.8, 存在强烈的正负反射异常界面, 推断该区域围岩整体较破碎, 局部破碎, 掉块、局部塌腔风险高。
	(2) K1+040.8~K1+060.8, 未见明显的正负反射异常界面, 推断该区域围岩整体较破碎, 存在掉块风险。
	(3) K1+060.8~K1+105.8, 该段存在的正负反射异常界面, 推断该区域围岩整体较破碎, 局部破碎, 掉块、局部塌腔风险高
TBM 激发极化法	(1) K1+005.8~K1+025.8, 三维电阻率图像中电阻率值偏低, 局部较低, 推断该区域围岩易出线状流水及股状出水。
	(2) K1+025.8~K1+035.8, 三维电阻率图像中电阻率值与前段相比稍有偏高, 推断该区域围岩易出线状流水
基于全过程信息的多源数据融合分析方法	(1) K0+991~K1+065, 断层破碎带塌方风险较高, 为二级风险、黄色风险, 应加强注意。
	(2) K1+065~K1+077, 断层破碎带塌方风险高, 为三级风险、红色风险, 应特别加强注意。
	(3) K1+077~K1+111, 断层破碎带塌方风险较高, 为二级风险、黄色风险, 应加强注意

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司的 GIM+智慧化超前地质预报系统集成本文的多源数据融合超前地质预报方法, 能够开展动态、智能化、透明化的超前地质预报分析与展示。为进一步查明掌子面前方围岩的地质情况, 进而预测前方的不良地质以及隐伏的重大不良地质问题, 避免并降低地质灾害发生的风险, 将现场已知的各类信息收集整理, 并在 GIM+智慧化超前地质预报系统对前方 100 m 的不良地质问题进行综合风险等级预报(见图 3)。

预报结果显示, K0+991~K1+065, 断层破碎带塌方风险较高, 为二级风险、黄色风险, 应加强注意。K1+065~K1+077, 断层破碎带塌方风险高, 为三级风险、红色风险, 应特别加强注意。K1+077~K1+111, 断层破碎带塌方风险较高, 为二级风险、

黄色风险, 应加强注意(见表 5)。

5.3 开挖验证结果

在后续的 TBM 掘进开挖过程中, 发现 K1+061~K1+080 段围岩破碎~较破碎, 拱顶及拱腰受多组结构面切割断续形成塌腔, 地下水呈滴水状态。主要发育 2 组结构面: ① 顺片麻理 EW/N $\angle$ 65°~75°, 结构面走向与隧道轴向呈中等角度相交(32°), 迹长>5m, 宽度范围 2~6 cm, 一般宽度 3 cm, 黄色碎粒岩, 断层泥, 挤压紧密, 弱风化, 泥见软化, 上盘宽 2~3 m, 镶嵌结构为主, 中~强锈, 裂面附岩粉和锈膜, 下盘宽 0.3~0.6 m, 镶嵌-碎裂结构, 中~强锈, 面附岩粉, 构造类型为切层错动带, 力学类型为岩屑夹泥型(黏粒含量<10%); ② SN/W $\angle$ 27°, 结构面走向与隧道轴向呈大角度相交

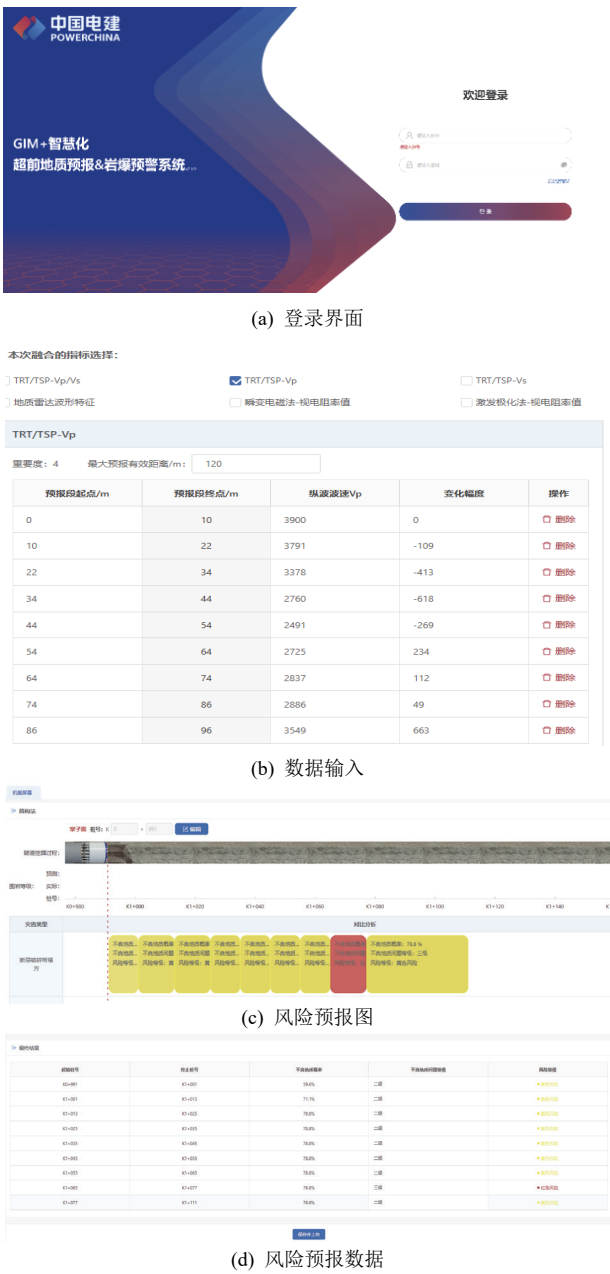
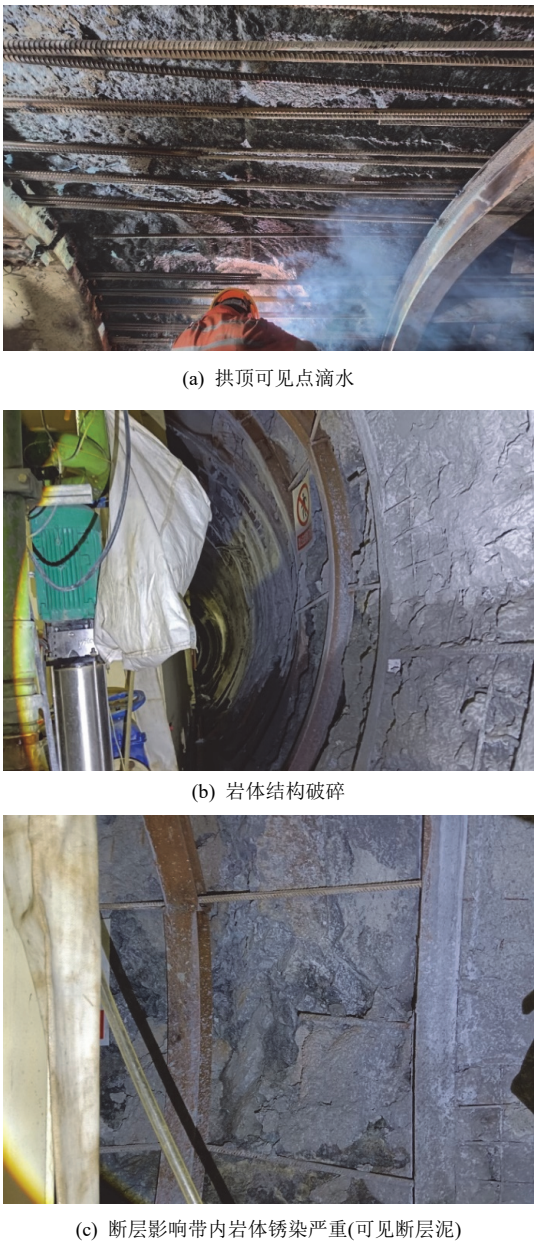


图 3 GIM+智慧化超前地质预报系统风险预报结果

Fig.3 Risk forecast results by GIM+ intelligent advanced geological forecast system

(58°), 缓倾右壁。从顶拱塌空处形态来看, 疑似沿片麻理产状垮塌(视线受阻), 塌落物质以灰白色碎块、碎粒、碎粉为主, 遇水软化、泥化。相关地质情况验证了基于全过程信息的多源数据融合分析方法预报结果的准确性(见图 4)。

将对比开挖验证结果里程与 TRT 弹性波法、CFC 复频电导法、TBM 地震波法、TBM 激发极化法, 及本文的多源数据融合超前地质预报方法进行对比, 用 $|\min(\text{开挖验证里程}) - \min(\text{方法里程})| + |\max(\text{开挖验证里程}) - \max(\text{方法里程})|$ 计算里程差值总和。验证了本文多源数据融合超前地质预报方



(a) 拱顶可见点滴水

(b) 岩体结构破碎

(c) 断层影响带内岩体锈染严重(可见断层泥)

图 4 开挖验证结果

Fig.4 Excavation verification results

法在超前地质预报中的精准度(见表 6)。

表 6 超前地质预报结果精度对比
Table 6 Comparison of advanced geological forecast result accuracy

预报方法	预报里程	里程差值总和/m
TRT 弹性波法	K1+028~K1+071	42
CFC 复频电导法	K1+058~K1+078	5
TBM 地震波法	K1+060.8~K1+105.8	26
TBM 激发极化法	-	-
基于全过程信息的多	K1+065~K1+077	7
开挖揭示	K1+061~K1+080	-

6 结 论

本文提出了基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法,实现了以灾害机制和影响因素为前提、以全过程信息指标为依托、以多源数据融合分析方法为手段的超前地质预报,解决了超前地质预报中信息综合利用程度低、各类信息间相互矛盾所造成的效率低、准确率低、对经验依赖性强等问题。

基于不良地质问题的机制和影响因素,建立了基于 7 大类信息、232 项指标的全过程指标库以及针对各不良地质问题的指标体系,为实现完整的、以地质条件为核心的综合预报奠定了信息基础。

提出了“指标测试值-指标风险值”的映射转换方法,将指标测试值转化为范围为 0~1 的归一化无量纲指标风险值,实现各指标量化形式和数据范围的一致性。结合现有规范要求,用统计大数据约束主观判断,解决了预报指标量化形式不一致、取值范围不一致、具体含义不一致的问题,为多源数据融合奠定了数据基础。

提出了一种多方法相结合的不良地质问题风险分析数据融合方法,构建了全面、准确评估地质条件的多源数据融合框架。指标融合计算区段划分方法解决了不同指标最大预报距离存在差异、同一指标的不同区段风险值不同的难题。层次分析法和 Huber 加权法结合的权重分析方法解决了不同指标针对同一不良地质问题的敏感性不同、同一指标针对不同不良地质问题的敏感性也不同的问题。将特定不良地质问题的指标风险值与权重值作为输入数据,采用加权平均法、模糊融合理论、拉普拉斯融合理论和贝叶斯平均法等多种数据融合方法结合,能够准确计算并有效获取相应的不良地质问题风险指数。

参考文献(References):

[1] 曲海锋,刘志刚,朱合华. 隧道信息化施工中综合超前地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 246 - 1 251.(QU Haifeng, LIU Zhigang, ZHU Hehua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 246 - 1 251. (in Chinese))

[2] 李术才,李树忱,张庆松,等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217 - 225.(LI Shucai, LI Shuchen, ZHANG Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217 - 225. (in Chinese))

[3] 李天斌,孟陆波,朱 劲,等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 429 - 2 436.(LI Tianbin, MENG Lubo, ZHU Jin, et al. Comprehensive analysis method for advanced forecast of geology in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 429 - 2 436. (in Chinese))

[4] 梁博森. 基于物探方法提高巷道掘进超前预报精度的研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017, (14): 58, 75.(LIANG Bosen. Research on improving the accuracy of advance prediction of roadway excavation based on geophysical prospecting method[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2017, (14): 58, 75. (in Chinese))

[5] 刘 斌,聂利超,李术才,等. 三维电阻率空间结构约束反演成像方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2 258 - 2 268.(LIU Bin, NIE Lichao, LI Shucai, et al. 3D electrical resistivity inversion tomography with spatial structural constraint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2 258 - 2 268. (in Chinese))

[6] 徐善初,陈建平,左昌群,等. 模糊综合评判法在隧道施工岩溶预报中的应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 76 - 81.(XU Shanchu, CHEN Jianping, ZUO Changqun, et al. Application of the fuzzy comprehensive evaluation method to karst forecasting in tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(5): 76 - 81. (in Chinese))

[7] 李术才,李晓昭,靖洪文,等. 深长隧道突水突泥重大灾害致灾机制及预测预警与控制理论研究进展[J]. 中国基础科学, 2017, (3): 27 - 43.(LI Shucai, LI Xiaozhao, JING Hongwen, et al. Research development of catastrophe mechanism and forecast controlling theory of water inrush and mud gushing in deep long tunnel[J]. China Basic Science, 2017, (3): 27 - 43. (in Chinese))

[8] 张 平,任 松,吴 斐,等. 多源数据融合的深埋隧道岩爆预测方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2024, 54(3): 707 - 716.(ZHANG Ping, REN Song, WU Fei, et al. Prediction method of rockburst in deep buried tunnel based on multi-source data fusion[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2024, 54(3): 707 - 716. (in Chinese))

[9] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.(LIU Shucai. Mechanism of water inrush from coal seam floor and continuous survey of fractured

- zones in coal seam floor[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.(in Chinese))
- [10] 底青云, 王妙月, 伍法权, 等. 地球物理综合勘探技术在水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 631 - 3 638.(DI Qingyun, WANG Miaoyue, WU Faquan, et al. Geophysical exploration over long deep tunnel for west route of south-to-north water transfer project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 631 - 3 638.(in Chinese))
- [11] XUE G Q, YAN Y J, LI X. Pseudo-seismic wavelet transformation of transient electromagnetic response in engineering geology exploration[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(16): 377 - 396.
- [12] 杨建辉, 沈 恺, 周 杰, 等. 穿越富水断层破碎带隧道塌方机制分析与预防[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 248 - 257.(YANG Jianhui, SHEN Kai, ZHOU Jie, et al. Mechanism and prevention of tunnel collapse through water-rich fault fracture zone[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 248 - 257.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50287—2016 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50287—2016 Code for hydropower engineering geological investigation[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2016.(in Chinese))
- [14] SAATY R W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used[J]. Mathematical Modelling, 1987, 9(3/5): 161 - 176.
- [15] ZHANG K, CHIBATI N, REVIL A, et al. Induced polarization of volcanic rocks-6: relationships with other petrophysical properties[J]. Geophysical Journal International, 2023, 234(3): 2 375 - 2 393.
- [16] EREMENKO A A, MULEV S N, SHTIRTS V A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions[J]. Journal of Mining Science, 2022, 58(1): 10 - 19.
- [17] ZHANG K, XUE Y, XU Z, et al. Numerical study of water inflow into tunnels in stratified rock masses with a dual permeability model[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(7): 260 - 271.
- [18] DESIFATMA E, DJAJA IGPFS, PRATOMO P M, et al. Robust inversion of 1D magnetotelluric data using the Huber loss function[J]. Computational Geosciences, 2024, 28(4): 629 - 643.
- [19] 朱 珍, 王旭春, 袁永才, 等. 基于加权平均法的岩溶隧道突涌水风险评估[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 51 - 54.(ZHU Zhen, WANG Xuchun, YUAN Yongcai, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based onweighted average method[J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 51 - 54.(in Chinese))
- [20] ZYADA Z, KAWAI Y, MATSUNO T, et al. Fuzzy sensor fusion for mine detection[C]// SCIS & ISIS 2006. [S. l.]: [s. n.], 2006: 349 - 354.
- [21] 蒙友波, 廖艳梅, 覃 锋, 等. 遥感影像融合下自然资源地类特征提取仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9): 162 - 166.(MENG Youbo, LIAO Yanmei, QIN Feng, et al. Simulation of natural resource land feature extraction based on remote sensing image fusion[J]. Computer Simulation, 2023, 40(9): 162 - 166.(in Chinese))
- [22] SLOUGHTER J M L, RAFTERY A E, GNEITING T, et al. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging[J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(9): 3 209 - 3 220.