

# 集成多种物探方法的蒙华铁路某隧道超前地质预报及对策

张超<sup>1</sup>, 龙四春<sup>1,2\*</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**蒙华铁路某隧道穿越岩溶发育区和断裂破碎带,地质构造极其复杂,施工建设风险大,仅靠单一的物探方法很难满足其地质灾害超前预报要求.本文提出采用TST、地质雷达和瞬变电磁法综合超前地质预报技术,对隧道掌子面前方的地质构造及异常进行探测与集成优化解译,确定不良地质体的位置、规模及其特征,确保隧道施工安全.该综合物探方法采用加权集成模式,实现了对掌子面前方围岩长中短距离联合探测,TST采用空间阵列观测方式和偏移成像方法,弥补了地质雷达和瞬变电磁法在解决围岩构造方面存在的判断岩体强度和破碎程度的缺陷.地质雷达利用电磁波对于水的敏感性,能很好地辨别出含水岩体,瞬变电磁法通过岩体电阻率,能识别出岩体中水的赋存状态,两者结合弥补了TST对于围岩含水性不敏感的缺陷.结果表明:采用综合物探方法能更加准确地探明隧道溶洞、裂隙与水系等不良地质体的位置与分布,为合理注浆与涌水封堵等提供了科学依据.

**关键词:**隧道;TST;地质雷达;瞬变电磁法;超前地质预报;集成

**中图分类号:**U452 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)03-0069-10

## Advance Geological Prediction and Countermeasures of a Tunnel in Sino-Mongolian Railway by Integrated Geophysical Prospecting Method

Zhang Chao<sup>1</sup>, Long Sichun<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Resources Clean-Utilization and Mine Environmental Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The tunnel of Sino-Mongolian railway passes through the karst development zone and fracture zone. The geological structure is very complex, and the construction risk is great. It is difficult to meet the requirement of geological hazard prediction by only one geophysical method. This paper puts forward to adopt the TST, geological radar and transient electromagnetic method of integrated geological forecast technology, geological structure on the front of the tunnel face detection and integrated optimization, accurate interpretation of the adverse geological location, scale and characteristics, so as to ensure the safety of the tunnel construction. The integration mode of the integrated geophysical method realizes the detection of short distance in front of the tunnel face surrounding rock in length at the same time, using TST spatial array observation and migration imaging method for geological radar and transient electromagnetic method in solving the defects of the surrounding rock structure. Geological radar and transient electromagnetic method make uses of the difference of dielectric

收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41474014);湖南省教育厅重点资助项目(15A060)

\* 通信作者,E-mail: selong@hnust.edu.cn

conductivity and dielectric constant of different media to make up for the insensitivity of TST to the moisture sensitivity of surrounding rock. Results show that the method of comprehensive geophysical prospecting can more accurately verify the location of unfavorable geological bodies such as karst cave, fissure and water system, and provide scientific basis for reasonable grouting and water plugging.

**Keywords:** tunnel; TST; geological radar; transient electromagnetic method; advance geological prediction; integrate

随着我国开发战略的持续推进,在岩溶地区修建隧道的过程中极易遭遇溶洞、暗河、断层破碎带等不良地质而发生塌方、突水突泥等地质灾害,严重威胁到施工人员的生命财产安全.因此,在隧道施工中开展超前地质预报尤为重要.自20世纪90年代开始,我国学者在隧道超前地质预报方面取得了丰厚的成果,自主研发了包括TST、地质雷达、瞬变电磁法和高密度电法等在内的多种超前预报技术.但每种方法都有其自身的优点与局限性.TST能够很好地表征岩体力学性质变化和构造组合特征,对断裂带和破碎带较敏感,但对于围岩含水性的敏感程度仍有待提高<sup>[1-3]</sup>.地质雷达利用电磁波对水敏感的特性,能很好地识别出含水界面,但在软岩硬岩的反应上不易区分;瞬变电磁法能很好地反映出岩体中水的赋存状态,对岩体强度和破碎程度不易判断<sup>[4]</sup>.隧道工程对超前地质预报工作的要求很高,复杂的地质条件,单一超前预报方法往往不能满足其精度要求.因此,集成多种物探方法,融合超前预报数据对保障隧道施工安全具有重要意义.

在综合超前预报技术研究方面,葛颜慧等人<sup>[5]</sup>运用模糊数学模型建立了基于风险评价的岩溶隧道综合超前地质预报体系.李利平等人<sup>[6]</sup>深入研究了岩溶突水的灾变演化过程及其力学机理,从预防与治理角度首次提出岩溶隧道施工突水灾害综合超前预报技术.蔡俊华<sup>[7]</sup>基于综合超前地质预报技术体系,建立了破碎带涌水隧道施工许可机制.石少帅等人<sup>[8]</sup>基于宜万铁路等工程经验,提出了岩溶隧道突水的三期综合预测方法.徐颖等人<sup>[9]</sup>基于复杂地质构造区域岩溶风险规避机制,提出了以地质分析法为核心的综合物探方法体系.在综合超前预报技术实际工程应用方面,宗义江等人<sup>[10]</sup>通过TSP和瞬变电磁法的集成应用,为高承压水作用下突水巷道注浆恢复与支护提供了依据.黄毓铭等<sup>[11]</sup>应用高密度电法与地质雷达的综合物探方法对南宁地铁溶洞进行了有效探测.陈昌彦等人<sup>[12]</sup>采用地质雷达和多道瞬态瑞雷波的综合物探方法,探测和评价了地下煤矿采空区对公路沉陷变形的影响,建立了有效的综合物探解释标志,为地质灾害治理提供了依据.本文拟提出应用TST、地质雷达和瞬变电磁法的综合超前地质预报实验.

## 1 综合物探方法基本原理及组合模型

### 1.1 TST基本原理与探测模型

TST(Tunnel Seismic Tomography, TST)是基于地震散射波理论的超前预报方法,它是采用空间阵列的观测方式,通过对不同方向的回波进行三维波场分离、围岩波速扫描、地质构造偏移成像等技术,重建波速异常体的空间结构图像,得到异常散射体的强度与位置分布<sup>[13,14]</sup>.在地震波法超前地质预报技术中,掌子面前方围岩波速分布准确信息的获取尤为重要.这直接关系到围岩工程类别的判断和异常地质体的准确定位.与其他地震波超前地质预报方法相比,TST解决了掌子面前方围岩波速准确分析的问题.通过TST技术,我们能够获取掌子面前方围岩波速 $V$ 的准确信息,围岩波速 $V$ 能够很好的表征岩体工程力学性状的变化,为分析确定不良构造的位置提供依据.

### 1.2 地质雷达基本原理与探测模型

地质雷达是一种利用电磁波在不同介质中产生透射、反射的特性来进行超前地质预报的方法<sup>[15,16]</sup>.其基本原理可用式(1)表达:

$$X = \frac{1}{2}VT. \quad (1)$$

式中: $X$ 为穿透深度; $V$ 为电磁波在介质中的传播速度; $T$ 为电磁波在介质中的双程旅行时间.电磁波在介

质中传播时,其传播时间、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态的差异而产生变化,将接收的回波波形进行处理,可得到波形信号强度  $D$ ,振幅  $A$ ,频率  $f$  等信息,根据这些信息综合推测异常体的结构和位置.

### 1.3 瞬变电磁法基本原理与探测模型

瞬变电磁法是一种时间域电磁法,它是利用阶跃电磁脉冲激发,不接地回线向掌子面前方发射一次场,在一次场断电之后,测量由介质产生的感应二次场随时间的变化,探测出介质的电阻率  $\rho$ ,从而达到寻找各种地质目标体的超前预报方法<sup>[17]</sup>.由于瞬变电磁法的数学模型比较复杂,这里给出其基本原理图如图 1 所示.

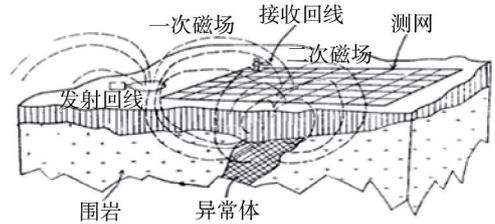


图 1 瞬变电磁法原理

### 1.4 集成物探模式的实现及优势

将隧道及其周围地质环境看作一个系统模型,断层破碎带、富水带、溶洞等不良地质体是系统模型中的一个基模型,现有 1 个包含  $m$  种物探方法的样本训练集,对于不同类型的基模型  $1, 2, \dots, n$ ,根据每种物探方法的优势进行选择性的抽样训练,每个基模型都选出一个训练效果最好的样本  $A, B, \dots, N$ .现有 1 个包含不同类型基模型的综合体,我们将每种基模型对应的最优训练样本进行加权集成,并且每种最优训练样本都根据工程实践经验赋予一定的权重,从而进行综合预测.这种集成模式的数学模型可以表示为式(2).

$$Y = \omega_1 Y_1 + \omega_2 Y_2 + \dots + \omega_n Y_n. \tag{2}$$

式中: $Y$  为综合基模型体; $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  为每种基模型对应的最优训练样本; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  为每种最优训练样本所占的权重,  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, 0 \leq \omega_i \leq 1$ .加权集成理论模型结构见如图 2.

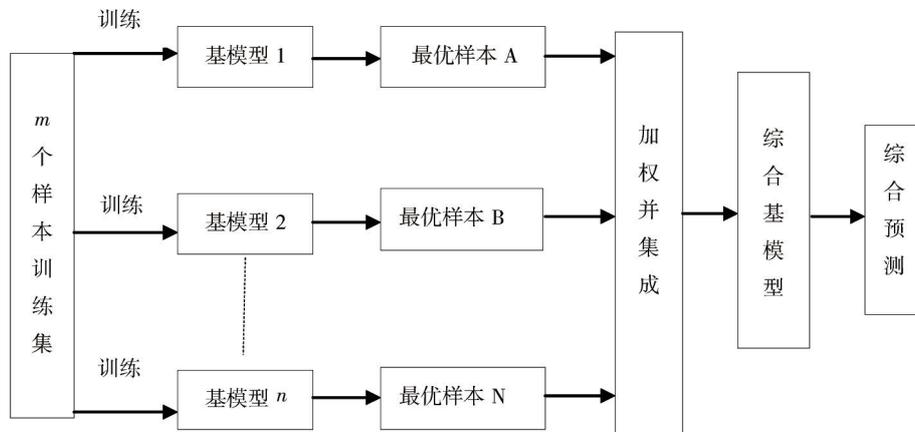


图 2 加权集成理论模型

基于上述 TST,地质雷达,瞬变电磁法的基本原理和加权集成的思想,将每种方法所获得的关键信息进行集成,得到一种综合超前地质预报模型可用式(3)表达.

$$Z = \omega_1 V + \omega_2 (DAf) + \omega_3 \rho. \tag{3}$$

式中: $Z$  为综合预报模型; $V$  为掌子面前方岩体的波速,表征岩体工程力学性状的变化; $D, A, f$  分别为电磁波在岩体中传播时的信号强度、振幅和频率信息,以区分不同电性的岩体分界面; $\rho$  代表岩体的电阻率,表征岩体构造及其所含水的赋存状态.对于模型中各权重的确定,我们应用层次分析法并结合工程实例详细进行说明.

基于地面地质调查和设计资料,对于隐患区段,分别采用 TST 进行长距离空间探测,瞬变电磁法进行中距离平面探测,地质雷达进行短距离线性探测,分别给出围岩波速图像和地质构造图像,围岩电阻率剖

面图像和围岩电磁波反射图像,这样就形成了长-中-短距离相结合,空间-平面-线互为验证为一体的集成物探模式.对于各种不良地质体的预报,将3种图像按照不同的权重进行集成分析.例如对于断层破碎带的预报,TST所占权重较多,地质雷达和瞬变电磁法所占权重相对较少.而对于含水性的预报,地质雷达和瞬变电磁法所占权重较多,TST所占权重相对较少.通过3种图像的集成分析对掌子面前方是否存在不良地质体进行最终判断,并采取相应的措施指导施工.具体实施流程见图3.

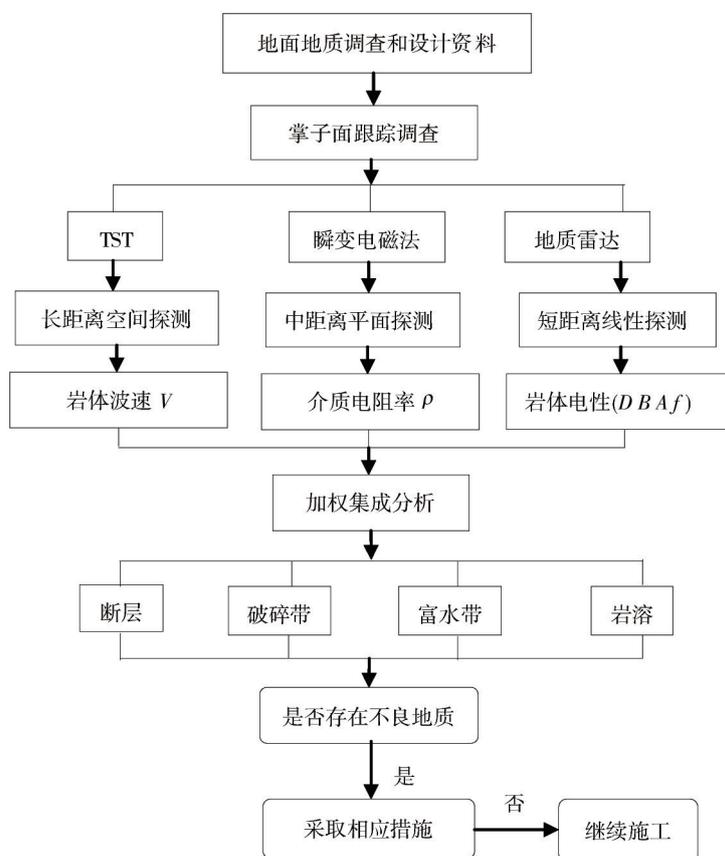


图3 集成物探实施流程图

## 2 综合物探方法的实际应用及结果分析

### 2.1 工程概况

测区位于河南省南阳市西峡县西坪镇境内,为丘陵地貌,地形起伏大,隧道区大部分基岩裸露,局部地段有残坡积土层分布,出露的地层为元古界秦岭群界牌组、白垩系上统地层.其元古界秦岭群界牌组地层主要岩性为粉质黏土、云母石英片岩及少量大理岩.白垩系上统地层主要岩性为砾岩、砂砾岩、砂岩、泥质砂岩.隧道穿越的地层主要有云母石英片岩、砾岩、泥质砂岩,属于硬质岩石和可溶岩.隧道洞身围岩等级以V级为主,隧道多处里程区间穿越岩溶发育带和断裂破碎带.受岩溶发育带和断裂破碎带的影响,隧道内围岩裂隙较发育,围岩较破碎,且时有涌水现象发生.超前地质预报的目的是探明测区内岩溶和断层破碎带的位置和规模,判断出涌水点的位置,并制定合理的注浆封堵措施.

### 2.2 综合物探方案与实施

首先利用TST技术对该里程区间进行长距离预报,预报距离110 m,通过围岩波速分布图像和地质构造偏移图像,判断出岩溶和破碎带的位置.其次利用瞬变电磁法对该里程区间进行中距离预报,预报距离80 m,通过围岩的电导率分布,分析围岩中水的赋存状态.最后利用地质雷达对该里程区间进行短距离分段预报,预报距离30 m,通过雷达波形图像识别出含水岩层.

### 2.3 预报成果综合对比、优化与集成

隧道施工过程中,采用本文提出的综合超前地质预报模型对多个重点里程区间进行了超前探测,其中

图 4 和图 5 分别为某段隧道 TST 地震波偏移图和围岩波速分布图,对应里程 DK818+500-DK818+380.图 4 横坐标表示里程,单位为 m;纵坐标表示预测宽度,单位为 m.图 5 横坐标表示里程,单位为 m,纵坐标表示波速,单位为 m/s.

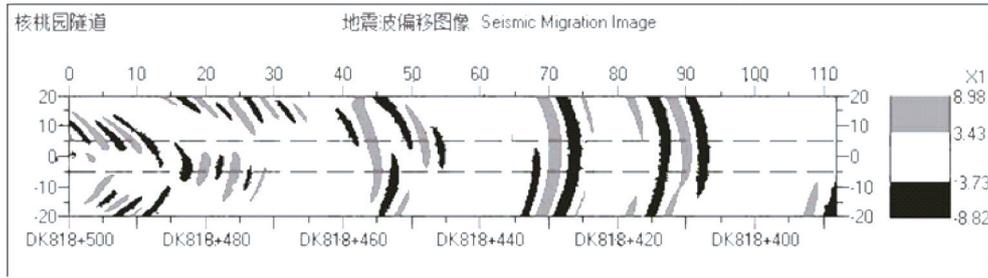


图 4 地震波偏移

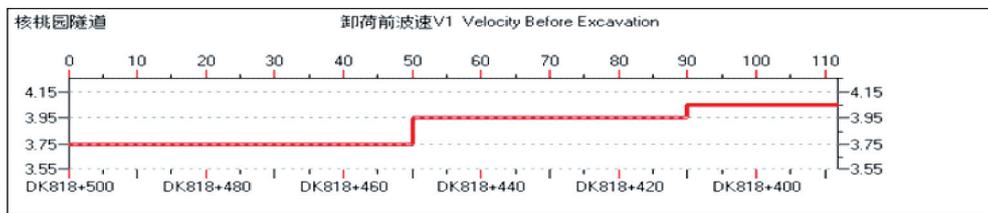


图 5 围岩波速分布

图 4 中条纹代表围岩中的岩石反射界面,灰色代表岩体由软变硬的反射界面,黑色代表岩石由硬变软的界面.图 5 中围岩波速表征围岩的力学强度高,波速高表示岩体完整致密,波速变低表示岩体破碎.通过 TST 成果图分析,掌子面前方共发现 3 个不良地质区段.分别为 DK818+500-DK818+470,DK818+460-DK818+445 和 DK818+432-DK818+410. DK818+500-DK818+470 区段,围岩波速  $V$  值较低,表明岩体弹性模量低,较破碎,同时地震波偏移图像显示区域条纹较多,且呈交错排列,推断存在大范围富水溶洞. DK818+460-DK818+445 区段,围岩波速  $V$  值略有升高,同时地震波图像显示区域黑色条纹相对较多,推断为破碎带. DK818+432-DK818+410 区段,围岩波速  $V$  值升高,围岩强度有所增强,地震波偏移图像中该区段围岩黑色条纹减少,推断为裂隙带.

以 TST 预报成果分析为基础,对这 3 个不良地质区段,结合地质雷达图像和瞬变电磁仪成果图进行综合分析.图 6~图 8 为地质雷达成果图像,分别对应里程为 DK818+500-DK818+470,DK818+460-DK818+430 和 DK818+432-DK818+402.图 9 为瞬变电磁法成果图,对应里程为 DK818+500-DK818+420.

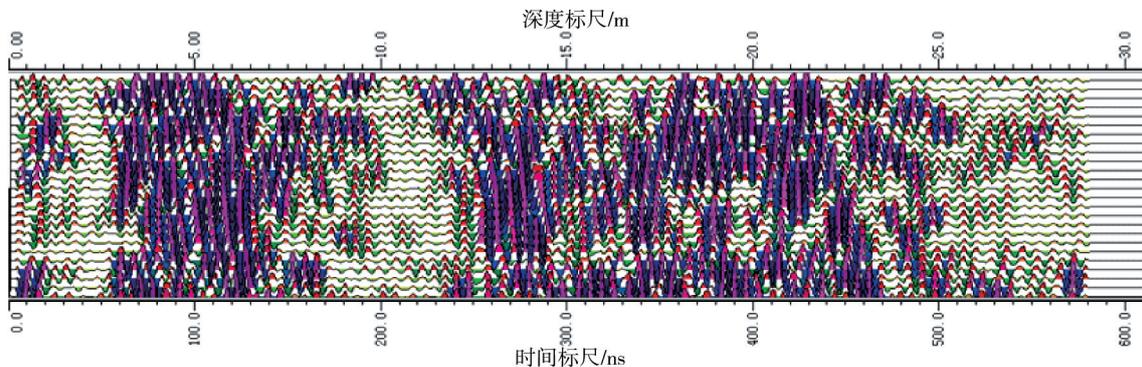


图 6 DK818+500-DK818+470 地质雷达成果

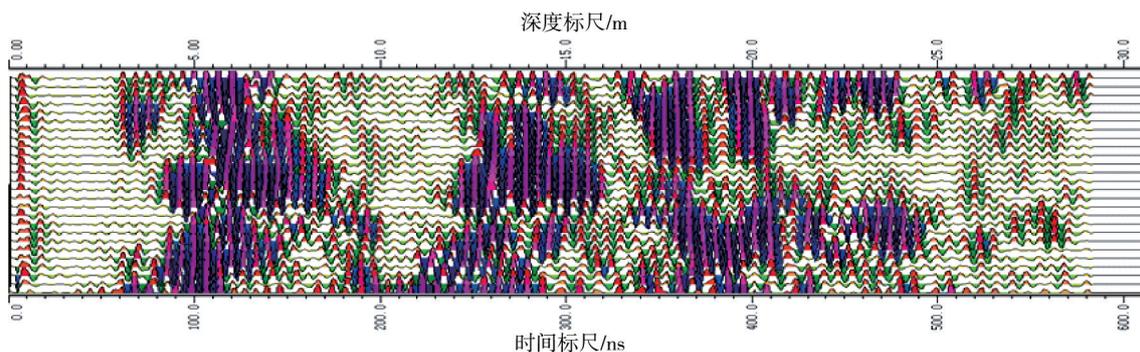


图 7 DK818+460-DK818+430 地质雷达成果

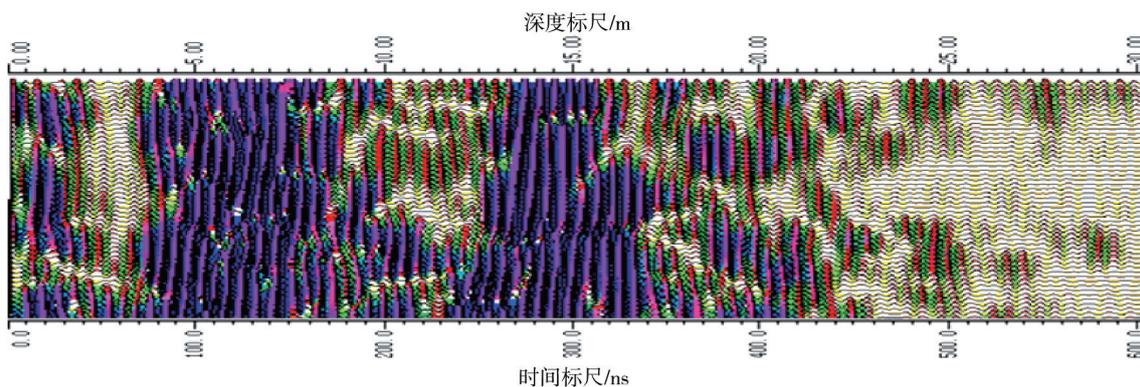


图 8 DK818+432-DK818+402 地质雷达成果

地质雷达图像的解译要点主要体现在电磁波信号的强度特征,振幅特征,频率特征 3 个方面.对于完整岩体,电磁波反射通常为中高频信号,信号强度和振幅都较弱.对于断层破碎带,电磁波信号反射较为强烈,通常为中频信号,信号振幅较强.对于富水带,电磁波信号一般表现为均匀的低频信号,电磁波信号频率快速变低,信号振幅强,且有多次震荡.基于上述解译要点,从图 6 可以看出,DK818+500-DK818+470 区段掌子面前方 0~25 m 范围内同相轴基本连续均一,电磁波信号呈层面状反射,信号强度( $D$ )较高,振幅( $A$ )较强,频率( $f$ )较低,局部信号反射呈弧状,振幅较强且存在多次信号震荡,推测存在含水溶洞.由图 7 可以看出,DK818+460-DK818+445 区段的电磁波信号强度( $D$ )相对较弱,信号振幅( $A$ )相对较强,信号频率( $f$ )为中低频,且呈带状区域化杂乱分布,推断为破碎带.由图 8 可以看出,DK818+432-DK818+410 区段的电磁波信号强度( $D$ )较弱,信号频率( $f$ )以中频为主,信号振幅( $A$ )较强,推断为裂隙带.

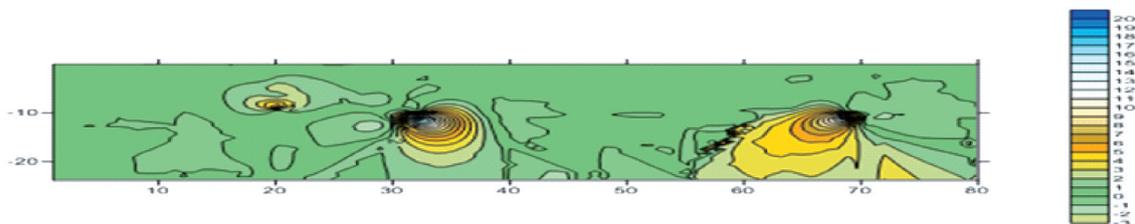


图 9 DK818+500-DK818+420 瞬变电磁法成果

瞬变电磁法成果图中未标注区域为高阻体,围岩不含水.标注区域代表低阻体,围岩破碎含水.通过瞬变电磁法成果图可知,掌子面前方 0~19,23~30,38~58,70~80 m 范围内,围岩的电阻率 $\rho$ 较低,岩体为低

阻体,推测围岩较破碎,含水,稳定性较差.

### 3 基于层次分析法的权重系数的确定方法

#### 3.1 层次分析法确定权重系数的使用方法

确定权重系数是度量系统或方案间相似度的重要内容,下面以此集成物探模式对岩溶的预报为例论述层次分析法确定权重系数的使用方法.

##### 3.1.1 建立层次结构模型

用层次结构表示实体类型及实体间联系的数据模型称为层次结构模型,对于层次结构模型的建立,美国运筹学家萨蒂教授提出了一种方法.具体来说,是将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的方法.以岩溶的预报为例,将岩溶的预报作为总的目标层,准则层则包括三个影响岩溶预报

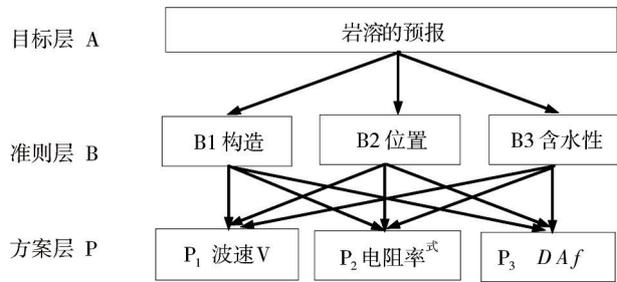


图 10 层次结构模型

方案选择的因素,方案层包括不同准则条件下 3 种不同的选择方案.根据该方法建立的层次结构模型见图 10.

##### 3.1.2 构造判断矩阵

通过相互比较确定各准则对于目标的权重,即构造判断矩阵.所谓判断矩阵是以矩阵的形式来表述每一层次中各要素相对其上层要素的相对重要程度,为了使各要素之间进行两两比较能够定量表示,引入矩阵判断标度(1~9 标度法),见表 1.

表 1 判断矩阵标度

标度	含义
1	表示 2 个要素相比,具有同样的重要性
3	表示 2 个要素相比,前者比后者稍重要
5	表示 2 个要素相比,前者比后者明显重要
7	表示 2 个要素相比,前者比后者极其重要
9	表示 2 个要素相比,前者比后者绝对重要
2 4 6 8	表示上述相邻判断的中间值

其中  $a_{ij}$  表示  $i$  相对  $j$  来说的比较结果,  $a_{ii} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ . 为了构造本次所需的判断矩阵,向 4 位专家进行了咨询,结合专家和作者的经验,构造的 3 个准则下的两两比较矩阵分别为

1) 判断矩阵 A-B (即相对于岩溶的预报这一目标,准则层各因素的相对重要性比较) 如表 2 所示.

表 2 A-B 判断矩阵

A	B1	B2	B3
B1	1	5	3
B2	1/5	1	1/3
B3	1/3	3	1

2) 判断矩阵 B1-P (即相对于构造特征,各方案的相对重要性比较) 如表 3 所示.

表 3 B1-P 判断矩阵

B1	P1	P2	P3
P1	1	4	5
P2	1/4	1	3
P3	1/5	1/3	1

3)判断矩阵 B2-P(即相对于位置特征,各方案的相对重要性比较)如表4所示。

表4 B2-P判断矩阵 B2

B2	P1	P2	P3
P1	1	3	4
P2	1/3	1	3
P3	1/4	1/3	1

4)判断矩阵 B3-P(即相对于含水性特征,各方案的相对重要性比较)如表5所示。

表5 B3-P判断矩阵 B3

B3	P1	P2	P3
P1	1	1/5	1/4
P2	5	1	3
P3	4	1/3	1

### 3.1.3 层次单排序及其一致性检验

对应于判断矩阵最大特征根的特征向量,经归一化后即为一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值,这一过程称为层次单排序。能否确认层次单排序,需要进行一致性检验。所谓一致性检验即检验判断矩阵求出的权重系数是否合理。当判断矩阵的随机一致性指标时,判断矩阵具有令人满意的一致性。其中为一致性指标,RI为平均随机一致性指标,当n值为1,2,3,4,5,6,7,8,9时,RI值分别为0.00,0.00,0.58,0.90,1.12,1.24,1.32,1.41,1.45。如果一致性检验通过,判断矩阵具有令人满意的一致性;否则要调整判断矩阵,直到一致性检验通过。下面以A-B判断矩阵为例说明层次单排序及其一致性检验的过程。

应用归一化的方法来计算判断矩阵的最大特征值及对应的特征向量,经进行计算求得判断矩阵A-B的最大特征值和对应的特征向量分别为 $\lambda_{\max} = 3.037$ ,  $\omega_0 = (0.634 \ 0.106 \ 0.260)^T$ ,对于判断矩阵A-B,  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{0.037}{2} = 0.0185$ ,  $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0185}{0.58} = 0.031 < 0.1$ 。说明判断矩阵A-B通过一致性检验,具有满意一致性,此时可用矩阵的特征向量代替权向量。根据上述方法,可计算出判断矩阵B1-P, B2-P, B3-P的最大特征值与对应的特征向量分别为: $\lambda_{\max}^{(1)} = 3.087$ ,  $\omega_1 = (0.665 \ 0.231 \ 0.104)^T$ ,  $\lambda_{\max}^{(2)} = 3.075$ ,  $\omega_2 = (0.608 \ 0.272 \ 0.120)^T$ ,  $\lambda_{\max}^{(3)} = 3.087$ ,  $\omega_3 = (0.097 \ 0.619 \ 0.284)^T$ ,应用上述方法均通过一致性检验。

### 3.1.4 层次总排序

层次总排序是指利用同一层次中所有层次单排序的结果,计算出对于上一层次而言本层次所有因素重要性的权值。经计算,层次总排序权值为: $P_1 = 0.51$ ,  $P_2 = 0.33$ ,  $P_3 = 0.15$ 。因此,对于岩溶的预报,TST权重为0.51,瞬变电磁法权重为0.33,地质雷达权重为0.16。

## 3.2 层次分析法确定权重系数的使用方法

为了检验层次分析法得出的权重系数的合理性,应用专家系统打分的方法进行检验。将DK818+500-DK818+470区段的TST图像,瞬变电磁仪图像,地质雷达图像分别交予4位不同的专家,请他们给出各图像在构造特征,位置特征,含水性特征3个方面的分值,各图像在各特征方面的得分取4位专家所给总分的均值,并计算出权重得分。最后将每种图像在3个方面的得分和,权重得分和分别进行排序并和应用层次分析法所得到的权重顺序进行比较。为了能够更加客观一致的进行评价,我们对每种特征的得分进行了统一约定:不明显,1分;一般明显,2分;较明显,3分;明显,4分。各图像不同特征得分表如表6所示。

表6 各图像不同特征得分

图像种类	构造特征得分	权重得分	构造位置得分	权重得分	含水性得分	权重得分	各权重得分和	各特征得分和
TST	3.75	1.91	3.50	1.78	2.00	1.02	4.71	9.25
TEM	2.50	0.83	3.00	1.00	3.25	1.07	2.90	8.75
GPR	2.00	0.32	3.00	0.48	3.00	0.48	1.28	8.00

从专家对各特征的打分情况来看,各特征的得分和由高到低的顺序是 TST>TEM>GPR,考虑了各特征的权重之后,其权重得分和由高到低的顺序仍为 TST>TEM>GPR.由此可见,应用层次分析法所得出的权重是合理的.

## 4 综合预报成果及验证

### 4.1 综合预报成果

应用上述提出的综合超前地质预报模型分析了测段内围岩的构造特征和含水性特征,并结合地质勘查资料和有关专家的意见,可以综合推断 DK818+500-DK818+470 段存在岩溶,推测涌水点位于右侧拱腰处,应设计合理的注浆孔位进行封堵,并提前做好排水措施. DK818+460-DK818+445 和 DK818+432-DK818+410 为破碎带,应加强支护等级,综合预报成果见表 7.

表7 综合预报成果

里程	地震波特征	电磁波波形特征	电阻率特征	综合预报结果	实际开挖情况
DK818+500-	波速低,条	层面状反射,同相	低	岩溶	大面积涌水
DK818+470	纹较多	轴基本连续			
DK818+470-	波速低,条	低频,同相轴基本	稍高	节理裂隙	裂隙较发育
DK818+460	纹少	连续			
DK818+460-	波速低,条纹	振幅强,同相轴不连	低	破碎带	围岩较破碎
DK818+445	相对多	续且存在错段			
DK818+445-	波速低,条纹	低频,振幅强,同	稍高	少量地下水	线性淋水
DK818+432	少	相轴基本连续			
DK818+432-	波速低,条纹	杂乱分布,同相轴	低	破碎带	围岩较破碎
DK818+410	相对多	不连续,存在错段			
DK818+410-	波速相对高,	低频,同相轴基本	稍高	节理裂隙	裂隙较发育
DK818+390	条纹少	连续			

### 4.2 结果验证及对策

为了进一步验证该综合超前地质预报模型的准确性,采用超前钻孔释水的方法进行验证.当隧道开挖至 DK818+500 里程时停止开挖,封闭掌子面并在推测涌水点位置附近应用潜孔钻进行超前钻孔释水,当钻至 4 m 左右时,右侧拱腰附近出现涌水,且涌水量较大,这与综合物探解译结果基本吻合,图 11 为现场涌水照片.为了保障施工安全,根据现场实际涌水情况,改变了施工方法和支护方式,采用 5 m 超前帷幕注浆,3 台阶临时仰拱法辅以洞身  $\Phi 89$  长管棚,对围岩和涌水点进行加固和封堵.



图11 现场涌水照片

## 5 结论

1)对TST,地质雷达,瞬变电磁法在超前地质预报中优缺点进行了评价和总结,基于加权集成模型提出了一种集成预报模式,并说明了具体实施流程.

2)以蒙华铁路隧道工程为依托,论证了该集成预报模式的可行性.实践证明,该集成预报模式准确探明了隧道岩溶和涌水点的位置,确保了隧道施工安全.

3)本文提出的集成预报模式在蒙华铁路岩溶隧道工程中得到了广泛应用,应用结果表明该集成预报模式适用于复杂地质条件下隧道工程的预报,对类似岩溶隧道超前地质预报具有借鉴和指导作用.

### 参考文献:

- [1] 赵永贵.国内外隧道超前预报技术评析与推介[J].地球物理学进展,2007,22(40):1344-1352.
- [2] 肖启航,谢朝娟.TST技术在岩溶地区隧道超前预报中的应用[J].岩土力学,2012,33(5):1417-1422.
- [3] 曹胜洪.TST超前预报技术在煤矿掘进巷道中的应用[J].煤炭与化工,2013,36(4):68-70.
- [4] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
- [5] Ge Y H, Li S C, Zhang Q S, et al. Comprehensive geological prediction based on risk evaluation during tunneling in karst area [J]. Chin J Geotech Eng, 2010, 32(7): 1124-1130.
- [6] Li L P, Tu W F, Shi S S, et al. Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(s1): 35-46.
- [7] Cai J H. Construction license mechanism of mountain tunnels based on inrush prediction of fracture zones [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 965-975.
- [8] Shi S S, Lin B, Li S C, et al. Application of comprehensive prediction method of water inrush hazards induced by un-favourable geological body in high risk karst tunnel: a case Study [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017, 36(1): 1-15.
- [9] 徐颖,左昌群,陈志超,等.推覆构造带碳酸盐岩隧道突水机制及风险规避[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):2886-2892.
- [10] Zong Y J. Grout-recovering and support technology of water-bursting roadway under high confined water pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 33(6): 993-997.
- [11] 黄毓铭,张晓峰,谢尚平,等.综合物探方法在南宁地铁溶洞探测中的应用[J].地球物理学进展,2017,32(3):1352-1359.
- [12] 陈昌彦,岳中琦,陈爱新,等.北京某公路沉陷变形地质灾害发育特征及成因分析[J].岩土工程学报,2010,32(2):357-363.
- [13] 熊浩森,朱斌.巴基斯坦尼鲁姆杰鲁姆水电项目TBM超前地质预报系统[J].土工基础,2017(3):378-382.
- [14] 肖启航,谢朝娟.TST技术在贵州高速公路顶效隧道超前地质预报中的应用[J].工程勘察,2010(7):89-94.
- [15] 吴火珍,焦玉勇,李海波,等.地质雷达检测防空洞注浆效果的技术方法及应用[J].岩土力学,2008(s1):307-310.
- [16] 刘新荣,刘永权,杨忠平,等.基于地质雷达的隧道综合超前预报技术[J].岩土工程学报,2015(s2):51-56.
- [17] 焦险峰,刘志新.瞬变电磁法浅层分辨率物理模型实验研究[J].中国矿业大学学报,2014(4):738-741.