

隧道激发极化法超前探测快速反演研究

聂利超, 李术才, 刘斌*, 李树忱, 钟世航

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 突(涌)水地质灾害是制约隧道等地下工程建设的瓶颈问题之一, 掌子面前方存在多个含水构造的情况普遍存在, 对隧道前方多个含水构造的超前探测是亟待解决的难题, 基于激发极化法中极化率参数对水体响应敏感的特点, 将其引入到隧道前方含水构造超前探测研究工作中, 从正演理论、反演解释、物理模拟和现场应用等方面入手对激发极化超前预报技术进行了较为深入的研究。首先, 推导了隧道掌子面前方多个含水构造激发极化法超前探测的理论解公式, 采用等效电阻率法计算视极化率观测数据, 为激发极化法超前探测快速反演奠定了基础。其次, 基于隧道前方多个含水构造的理论解, 提出了利用两个阻尼系数控制步长和搜索方向的思路, 解决了传统马奎特方法仅依靠一个阻尼系数很难有效同时控制两个变化因素的矛盾; 提出了一种改进的马奎特快速反演方法, 同时对视电阻率和激发极化数据进行反演, 使之对初始模型参数依赖较小, 收敛速度较快, 精度较高, 并对隧道前方存在多个含水构造模型进行了较为成功的反演。最后, 物理模型试验和现场实际应用表明, 激发极化法超前探测快速反演方法是行之有效的, 为解决隧道多个含水构造超前探测这一难题提供了可行的途径。

关键词: 隧道工程; 含水构造; 超前探测; 激发极化法; 阻尼最小二乘法; 快速反演; 物理模型试验

中图分类号: U452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0222-08

作者简介: 聂利超(1987-), 男, 河南通许人, 博士研究生, 主要从事地球物理正反演与不良地质体超前预报方面的研究。E-mail: lichaonie@163.com。

Fast inversion for advanced detection using induced polarization in tunnel

NIE Li-chao, LI Shu-cai, LIU Bin, LI Shu-chen, ZHONG Shi-hang

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Geological hazards such as water inrush have become one of the bottleneck problems for tunnel construction. It's very common that there are many water-bearing structures in front of tunnel face. And advanced detection of many water-bearing structures is a hard problem to be solved. Chargeability as one parameter of induced polarization (IP) is sensitive to water. And IP is introduced into the advanced detection of water-bearing structures in tunnels. IP on the advanced detection is deeply studied from the aspects of forward theory, inversion interpretation, physical simulation and application. Firstly, a theoretical formula for detecting many water-bearing structures is derived. And apparently chargeability data are calculated using the equivalent resistivity method, laying a solid foundation for fast inversion. Secondly, the traditional damping least squares inversion method controls two changing factors using one damping factor, which causes a contradiction. And the idea that two damping factors are used to control step length and search direction is put forward. The improved damping least squares inversion method with little dependence, fast convergence rate and high accuracy is put forward based on theoretical formula. Apparent resistivity and IP data are inversed at the same time. And many models for the water-bearing structures are inversed successfully. Finally, the physical model tests and engineering applications show that IP fast inversion method is efficient in detecting water-bearing structures. And it provides a feasible approach to solving the problem of advanced detection of many water-bearing structures.

Key words: tunnel engineering; water-bearing structure; advanced detection; induced polarization; damping least squares inversion method; fast inversion; physical model test

0 引言

近年来, 地球物理勘探方法正不断地拓宽其应用范围, 已经不仅局限于地球资源的勘探, 而以地下空

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51139004); 国家自然科学基金国际合作与交流项目(50820135907); 国家自然科学基金青年项目(41102183); 山东省自然科学基金项目(ZR2011EEQ013); 山东大学自主创新基金项目(2010TS038, 2010GN059)

收稿日期: 2011-01-20

*通讯作者

间科学开发和利用为目的的地球物理勘察已经得到越来越多的关注。随着中国基础建设和西部大开发进程的加快, 高速铁路战略性新兴产业的快速发展, 交通、矿山、水电等领域隧道工程越来越多。这些地下工程所遇到的工程地质条件异常复杂, 施工中面临着突水、突泥等诸多高风险地质灾害。突涌水灾害已经成为制约隧道等地下工程建设的瓶颈问题, 给施工安全带来了重大灾难和无法估计的经济损失。作为突涌水等地质灾害的源头, 开展掌子面前方的含水构造超前探测研究显得尤为迫切和重要^[1-3]。

目前通用的超前地质预报方法除采用工程地质推断之外, 主要依据定量化程度高的地球物理技术。以地球物理勘探方法为先导的超前地质预报成为最有效的解决途径之一, 常见的物探类超前地质预报方法有TSP法、陆地声纳法、地质雷达法和瞬变电磁法等方法。TSP法和陆地声纳法是隧道地震勘探方法, 对水体响应不明显。地质雷达法和瞬变电磁法对水体响应敏感, 可用来预报隧道掌子面前方的含水构造, 但地质雷达法的探测距离较近, 而瞬变电磁法易受隧道内金属构件的干扰造成误判。因此以目前的预报手段很难快速准确探明隧道施工过程中掌子面前方的水体病害。激发极化法是以介质的极化率等电性差异为基础, 对水体的响应敏感, 且受隧道空腔的影响微弱, 因此开展激发极化法超前预报的研究具有重要的工程意义^[4-7]。

激发极化法是一种常用的物探方法, Laurent等在瑞士阿尔卑斯山利用激发极化法探测滑坡面^[8]; Martinho等在实验室用激发极化法进行了土样中有机物污染的研究, 并得到了含有机物和不含有机物黏土样的激发极化响应^[9]; Nicolas等在考古领域研究了激发极化法定量探测古代矿渣规模和质量, 并在卡斯特矿山得到成功应用^[10]。目前激发极化法研究主要集中在地面探测, 用于隧道等地下工程的研究较少。

将激发极化法应用到隧道超前探测工作中将面临以下2个问题: ①首先, 隧道中开展激发极化方法研究较少, 在隧道直流电阻率法超前探测中, 黄俊革等^[11]、刘斌等^[12-13]分别利用阻尼最小二乘法, 进行了一个含水构造的超前探测研究, 不能代表工程实际中存在多个含水构造的情况, 隧道掌子面前方多个含水构造超前探测反演亟待研究, 而作为反演基础的隧道前方多个含水构造超前探测的响应函数有待提出和研究。②目前, 地面上激发极化法探测数据的二维三维反演技术日益提高, 阮百尧等^[14]、Oldenburg等^[15]、Li等^[16]、Weller等^[17]、吴小平等^[18]进行了激发极化法二维或三维的反演研究, 但三维反演需要巨大的计算机内存, 花费大量的计算时间, 而隧道的施工特点要求数据解

释时间短, 因此适合隧道等地下工程激发极化探测数据快速解释方法有待研究和提出。这是激发极化法在隧道超前探测中发展迫切需要解决的关键性难题。

针对以上问题, 本文推导出了适合隧道超前探测的一维层状地层极化率正演计算方法, 对隧道前方多个含水构造超前探测进行了正演研究; 基于等效电阻率法, 采用改进的马奎特反演算法, 对隧道前方多个含水构造进行了极化率的反演研究; 并开展了模型试验和现场应用, 对改进的马奎特算法进行了检验和评价。

1 全空间多个含水构造激发极化正演计算方法

1.1 全空间激发极化法超前探测工作方式

在不考虑隧道空腔的影响的全空间情况, 全空间超前探测可采用三极法, 以A点为供电点, 布置在隧道掌子面, M, N为接收电极, 以固定间距向掌子面后方移动, 多个含水构造的数学计算模型可以简化为图1所示, h_i 为第*i*种电性介质的厚度, ρ_i 为第*i*种电性介质的电阻率, d 为供电点距离第一层电性介质的距离。

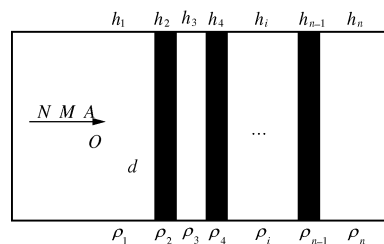


图1 全空间超前探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of advanced detection model in whole space

1.2 全空间激发极化法超前探测正演方法

以供电点A为坐标原点O, Z轴指向隧道开挖方向, 则稳恒电场满足如下方程^[19]:

$$\operatorname{div}(\sigma \cdot \operatorname{grad} U) = -I \delta(r_a) \quad (1)$$

对于超前探测的地电模型如图1所示, 具有轴对称性, 在柱坐标系中, 有

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{J_0(\lambda r)}{\partial r} \right) = -\lambda^2 J_0(\lambda r) \quad (2)$$

采用分离变量法, 推导出多个含水构造超前探测, 不同位置的电位的表达式:

$$U_z(r, z) = \frac{I \rho_i}{4\pi} \int_0^\infty [C_z e^{\lambda z} + A_i e^{-\lambda z} + B_i e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (3)$$

式中, 当 z 位于与供电点同一电性介质中时, 取 $C_z = 1$, 否则取 $C_z = 0$ 。

考虑到两个无穷远边界 $z \rightarrow -\infty, U \rightarrow 0$ 和 $z \rightarrow \infty, U \rightarrow 0$, 得 $A_i = B_i = 0$ 。由每一个电性介质分解面上电位连续和电流密度法向分量连续条件, M,

N 在 $r_M = r_N = 0$ 的 Z 轴上,则多个含水构造超前探测接收电位($z < 0$)的表达式:

$$U_z(z) = \frac{I\rho_1}{4\pi} \int_0^\infty (e^{\lambda z} + B_1 e^{\lambda z}) d\lambda \quad (4)$$

式中,

$$B_1 = \frac{T_2 - \rho_1}{T_2 + \rho_1} e^{-2\lambda d} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} T_n &= \rho_n \\ T_{i-1} &= \rho_{i-1} \frac{(T_i + \rho_{i-1}) + (T_i - \rho_{i-1})e^{-2\lambda h_{i-1}}}{(T_i + \rho_{i-1}) - (T_i - \rho_{i-1})e^{-2\lambda h_{i-1}}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

($2 \leq i \leq n$)。

对式(4)采用数值积分,计算出不同接收位置的电位,根据式(7)计算视电阻率。采用等效电阻率法计算视极化率:

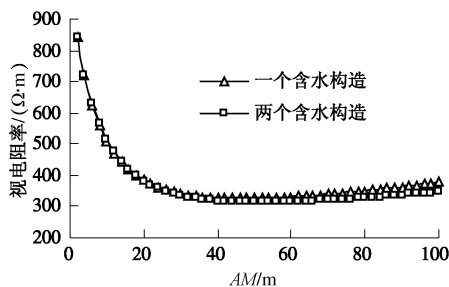
$$\rho_s = K \frac{U_M - U_N}{I} \quad (7)$$

$$\eta_s = \frac{\rho_s^* - \rho_s}{\rho_s^*} \quad (8)$$

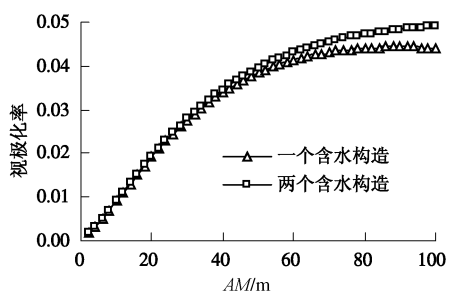
式中, ρ_s^* 为等效电阻率, η_s 为视极化率。

1.3 全空间激发极化法超前探测正演算例

计算多个含水构造的视电阻率和视极化率,设模型正常围岩电阻率为1000 ($\Omega \cdot m$),含水构造电阻率为10 ($\Omega \cdot m$);正常围岩的极化率为0.001,含水构造的极化率为0.1,供电点距离含水构造的距离 d 为2 m,电极间距 MN 为2 m。对于一个含水构造,第二层的厚度为2 m,第一层和第三层厚度无穷大;对于两个含水构造,第二、三和四层厚度为2 m,第一层和第五层厚度无穷大。计算结果如图2所示。



(a) 多个含水构造超前探测的视电阻率曲线



(b) 多个含水构造超前探测的视极化率曲线

图2 多个含水构造超前探测正演结果

Fig. 2 Forward modeling results of advanced detection of many water bearing structures

由图2可知,一个含水构造和两个含水构造在视电阻率和视极化率曲线上表现为尾部的差异,仅仅从视电阻率和视极化率正演曲线,区分隧道前方含水构造的情况比较困难,为此,适用于隧道超前探测的激发极化反演算法亟待研究。

1.4 隧道空腔的干扰响应分析

为了研究隧道空腔对激发极化超前探测产生的干扰影响,其解析解很难推导,借助有限元程序建立模型进行计算。模型参数仍采用1.3节中两个含水构造的地电模型参数,隧道断面为12 m×8 m,电阻率设定为 1.0×10^9 ($\Omega \cdot m$)。其计算结果图3所示。将含隧道空腔的视电阻率数据转换到全空间的数据,采用地面上去除地形影响的比较法^[11-12],视电阻率和等效电阻率的修正系数 k_1 , k_2 如图4所示。

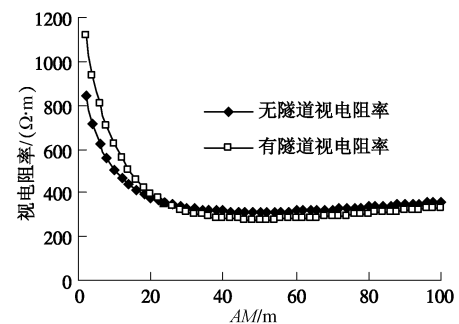


图3 隧道空腔对视电阻率的影响

Fig. 3 Influence of tunnel cavity on apparent polarizability

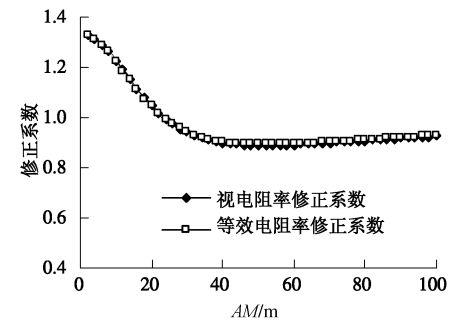


图4 隧道空腔影响的修正系数

Fig. 4 Correction coefficient for tunnel cavity influence

视电阻率和等效电阻率的修正系数极其相近,有 $k_1 \approx k_2$ 。由等效电阻率计算极化率的公式:

$$\eta_{st} = \frac{\rho_{st}^* - \rho_{st}}{\rho_{st}^*} = \frac{k_2 \rho_s^* - k_1 \rho_s}{k_2 \rho_s^*} = \eta_s \quad (9)$$

式中, ρ_{st}^* 为含隧道空腔的等效电阻率, ρ_{st} 为含隧道空腔的视电阻率, η_{st} 为含隧道空腔的视极化率, η_s 为全空间的视极化率。

由以上可知,隧道空腔对视电阻率的影响较大,表现在图4曲线的前端,而对视极化率的影响微乎其微,可以忽略。

2 隧道多个含水构造激发极化法超前探测反演

2.1 改进的马奎特反演算法

地球物理学中的反演理论的目的是根据观测数据求取相应的地球物理模型。当线性反演问题 $G = Am$, A 的行数和列数均大于自身的秩时,称为混定问题,解混定问题的解法通常称马奎特法,又称最小二乘法。其算法为

$$(A^T A + \alpha I) \Delta m = A^T \Delta G \quad (10)$$

马奎特算法综合了梯度法和高斯-牛顿法,因而它具有梯度法和高斯-牛顿法两者的特点。由于在对角线元素上加了一个正数 α ,从而极大地改善了系数矩阵 $[A^T A + \alpha I]$ 相对于 $[A^T A]$ 而言的求逆条件。因而马奎特法的系数矩阵有较好的条件数,对地球物理资料解释反演十分有利。在数据方程中出现奇异或病态时,加 α 后,往往可以稳定求解,阻尼最小二乘法在过去一段时间里被广泛采用。

此算法的关键在于选取合适的 α ,但是仅仅依靠一个因子 α 控制两个变化因素(步长和搜索方向),往往就会出现矛盾,适当的步长使函数值减小,但搜索方向却有可能未指向函数减小的方向;或者适当的搜索方向指向了函数减小的方向,但步长却不合适,从而导致目标函数收敛困难^[20-21]。

为解决以上矛盾,笔者引进另一个因子 β 来控制步长,另外,采用等效电阻率反演,为了提高反演效率和反演精度,同时反演电阻率数据和等效电阻率数据,改进后的马奎特算法如下:

$$\left. \begin{aligned} (A^T A + \alpha I) \Delta m &= A^T \Delta G, \\ \Delta m &= \Delta m / \beta. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 A 为视电阻率计算的偏导数矩阵; Δm 为模型参数的修正向量, $\Delta m = (\Delta m_1, \Delta m_2)$, 包含视电阻率和等效电阻率计算的模型参数的修正向量; ΔG 为模型参数正演的视电阻率、等效电阻率观测数据与实测数据的差向量,即 $\Delta G = (\Delta G_1, \Delta G_2)$, 包含视电阻率、等效电阻率数据与实测数据的差向量,且一次反演迭代同时得到视电阻率和等效电阻率反演的模型参数。

2.2 隧道含水构造激发极化超前探测反演

因隧道环境条件,测线布置方向垂直电性层面,视电阻率和视极化率曲线上,未出现像地面探测可以判断层数的特征。为此,层数这一参数必须在反演中判定。假设在激发极化法探测范围内不同的电性层数最多是7层,以7层电性层模型进行实测激发极化数据的反演,从反演结果中判断层数和不同电性层的参数。则隧道多个含水构造激发极化法超前探测的流程如

下:

(1) 首先,利用隧道空间的修正系数将实测视电阻率数据转换为全空间的视电阻率数据,利用等效电阻率法将实测的视极化率数据转换为等效电阻率数据。

(2) 设置模型初始参数,即设置反演初值,由模型参数进行正演计算,计算目标函数,即正演数据与转换后的实测数据之差的平方和。

(3) 如果(2)中计算的目标函数值小于预先给定的精度值,则输出模型参数;如果目标函数值大于预先给定的精度值,则求解模型参数校正向量。

(4) 用模型校正向量对模型参数进行校正,将校正后的模型作为初始模型,重复步骤(2)和(3),直至目标函数值小于预先给定的精度值,输出模型参数。

表1为多个模型正演后的反演结果,采用 Intel(R) Core (TM) 2 Duo 处理器反演耗时均小于 120 s。表中第二层、四层和六层为含水构造,第一层、三层、五层和七层为正常围岩,第一层和七层厚度为无穷大(表1中未列出)。

从表1中,可以判断出,第一、二个模型为三层地电模型(一个含水构造),第三、四个模型为五层地电模型(两个含水构造),第五、六个模型为七层地电模型(三个含水构造),同时反演得到了各含水构造的详细参数,可对含水构造进行定量解释,对比可发现以下规律:

(1) 改进后的马奎特反演算法对初值的依赖性较小,对于给定的初值,改进后的马奎特方法均能较好的收敛,且反演耗时较短,收敛速度较快。

(2) 供电点距离第一个含水构造的距离 d 以及围岩的电阻率、极化率与真实的模型参数误差很小,与真实模型参数一致。

(3) 含水构造的视电阻率、极化率和各电性层的厚度与真实的模型参数相近,误差较小,且各电性层的厚度随着层数的增加误差有增大的趋势,但实际模型含水构造的厚度与电阻率的比值和反演模型含水构造的厚度与电阻率比值一致,反演结果反映了含水构造的厚度与电阻率的组合值。

3 物理模型试验

3.1 模型试验设计

本模型选择几何因素比值 G 为20,将配置好的试验材料,分层压实,以便控制试验材料参数,在试验材料填充区域开挖出隧道腔体、含水构造,其中隧道腔体的尺寸为长5.0 m×宽0.6 m×高0.4 m;含水构造的尺寸宽1.5 m×厚0.2 m×高1.5 m,两个含水构造完全相同,命名为断层1和断层2。

表 1 不同模型的反演结果
Table 1 Inversion results of different models

模型		距离 d/m	围岩电阻 率 $/(\Omega \cdot \text{m})$	围岩极 化率	含水构造 电阻率 $/(\Omega \cdot \text{m})$	含水构造 极化率	厚度/ m				
							第二层	第三层	第四层	第五层	第六层
模型一	反演初值	20	1500	0	1500	0	20	20	20	20	20
	实际模型	2	1000	0.001	10	0.1	2	无穷大	—	—	—
	反演模型	1.998	1000.041	0.001	11.322	0.078	2.265	1621.286	4.131	32.995	5.833
模型二	反演初值	10	1500	0	1500	0	15	10	20	10	15
	实际模型	2	1000	0.001	10	0.1	2	无穷大	—	—	—
	反演模型	2	1000.019	0.001	10.27	0.081	2.054	1143.945	0.588	22.604	0.75
模型三	反演初值	20	1500	0	1500	0	20	20	20	20	20
	实际模型	2	1000	0.001	10	0.1	2	2	2	无穷大	—
	反演模型	1.99	1000.183	0.001	15.195	0.067	3.015	1.818	2.919	28.764	0.254
模型四	反演初值	10	1500	0	1500	0	15	10	20	10	15
	实际模型	2	1000	0.001	10	0.1	2	2	2	无穷大	—
	反演模型	1.99	1000.2	0.001	15.518	0.072	3.073	1.798	2.992	37.739	0.3
模型五	反演初值	20	1500	0	1500	0	20	20	20	20	20
	实际模型	2	1000	0.001	10	0.1	2	2	2	2	2
	反演模型	1.987	1000.148	0.001	17.906	0.08	3.7	2.326	6.051	7.172	1.024
模型六	反演初值	10	1500	0	1500	0	15	10	20	10	15
	实际模型	2	1000	0.001	10	0.1	2	2	2	2	2
	反演模型	1.989	1000.118	0.001	17.0	0.1	3.492	2.257	5.09	3.772	1.633

表 2 物理模型试验反演结果
Table 2 Inversion results of physical model tests

模型	距离 d/m	围岩电阻 率 $/\Omega\text{m}$	围岩 极化率	含水构造 电阻率 $/\Omega\text{m}$	含水构造 极化率	厚度/ m		
						第二层	第三层	第四层
实际模型	12(0.6)	340	0.01	2	0.3	4(0.2)	14(0.7)	4(0.2)
反演模型	11.961	340.007	0.01	4.871	0.281	9.727	12.712	6.545

3.2 模型试验数据分析

在隧道底板设置了一条测线，测线长度为3.5 m，电极间距为0.2 m，如图5（c），采用定点源三极方式进行超前探测。视电阻率和视极化率曲线如图6所示。将以上数据经过简单圆滑滤波之后，转换成全空间的

探测数据，反演结果如表2所示（括号内为模型尺寸）。

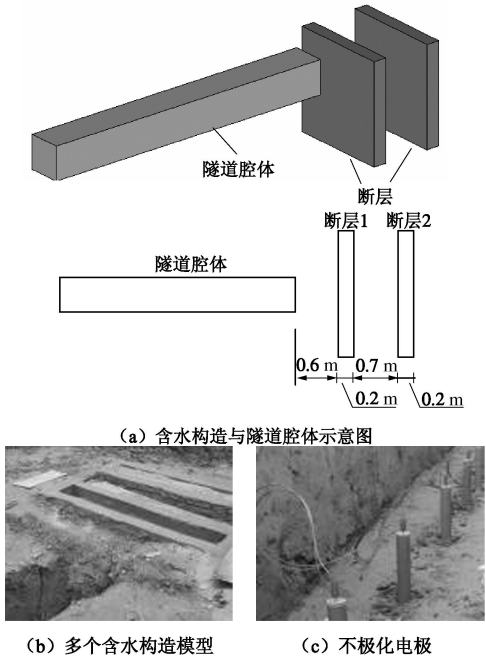


图 5 多个含水构造超前探测模型试验

Fig. 5 Model tests on advanced detection of many water bearing structures

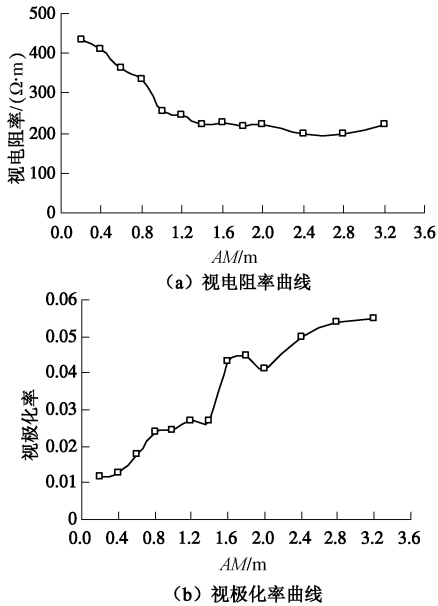


图 6 两个含水构造超前探测激发极化数据

Fig. 6 Induced polarization data of advanced detection of two water bearing structures

分析表2可知，对激发极化法多个含水构造超前探测实测数据反演效果较好，含水构造的厚度和电阻率反演与模型参数值有些误差，但实际含水构造的厚度与电阻率的比值，和反演含水构造的厚度与电阻率比值一致。模型试验再次验证了改进的马奎特反演激发

极化法超前探测是行之有效的。

4 工程应用

4.1 三峡翻坝高速公路鸡公岭隧道

(1) 工程概况与地质分析

三峡翻坝高速公路位于湖北省宜昌市境内，是为缓解三峡坝区、葛洲坝区水运压力而建的一条重要通道。鸡公岭隧道进口位于艾家河右岸斜坡，隧道地处构造侵蚀溶蚀低山一丘陵地貌单元。隧址地表水和地下水发育，其中地下岩溶水分布不均衡，局部水量较大，具有承压性，施工中极易遭遇突水突泥灾害，开展了激发极化法超前探测。

(2) 探测数据分析

鸡公岭隧道左洞进口ZK19+509处开展了激发极化法超前地质预报，采用定点源三极法测量方式，视电阻率和视极化率曲线如图7所示。

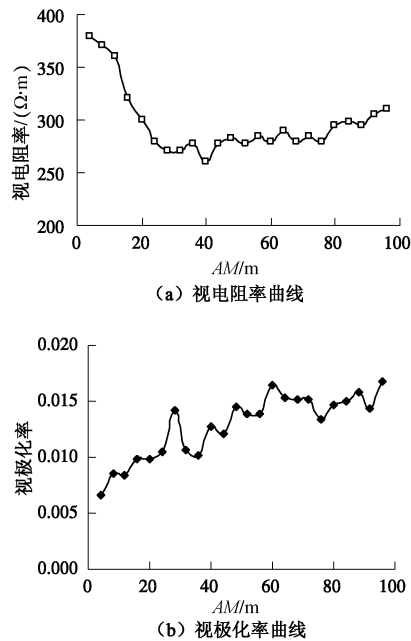


图 7 隧道超前探测激发极化数据

Fig. 7 Induced polarization data of advanced detection

(3) 探测效果评价

对激发极化数据进行反演，反演结果：距离 $d=3.010\text{ m}$ ，围岩电阻率= $390.011\text{ }(\Omega\cdot\text{m})$ ，围岩极化率= 0.006 ，含水构造电阻率= $25.874\text{ }(\Omega\cdot\text{m})$ ，含水构造极化率= 0.032 ，第二层厚度= 2.572 m ，第三层厚度= 5.012 m ，第四层厚度= 8.102 m 。推断在 ZK19+512—ZK19+514，ZK19+520—ZK19+530 段落存在含水构造。开挖结果显示 ZK19+512—ZK19+515 段落存在两条导水裂隙，在 ZK19+520—ZK19+530 段落围岩富水性较强，沿裂隙线状滴水与探测结果相符，见图 8。

4.2 锦屏二级电站#4 引水洞

(1) 工程概况与地质分析

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江锦屏大河湾处雅砻江干流上，岩溶水文地质问题成为引水线路区域主要的地质问题，在#4 引水隧洞相应段落具有发生涌水的风险，有必要开展含水构造的超前探测工作。

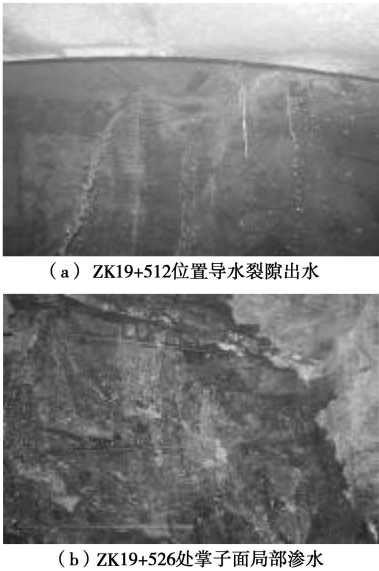


图 8 开挖结果

Fig. 8 Excavation results

(2) 预报数据分析

在锦屏二级电站#4引水洞ZK13+694位置开展了激发极化法超前探测，测线布置在隧道侧墙上，采用定点源三极法测量方式，视电阻率和视极化率曲线如图9所示。

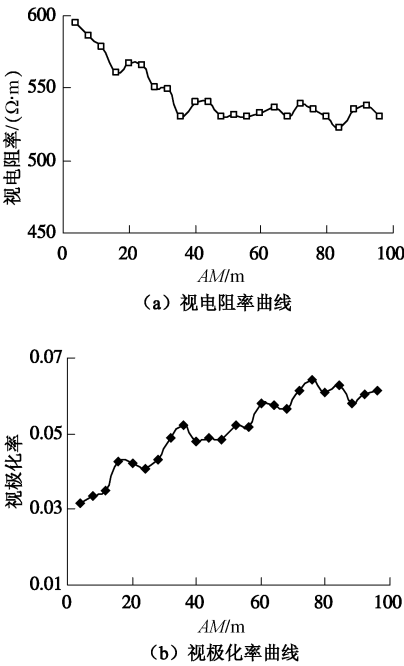


图 9 隧道超前探测激发极化数据

Fig. 9 Induced polarization data of advanced detection in a tunnel



(a) ZK13+673位置出水点



(b) ZK13+670位置出水点

图10 开挖结果

Fig. 10 Excavation results

(3) 探测效果评价

对激发极化数据进行反演, 反演结果: 距离 $d=20.002$ m, 围岩电阻率 $=600.002$ ($\Omega \cdot \text{m}$), 围岩极化率 $=0.03$, 含水构造电阻率 $=27.165$ ($\Omega \cdot \text{m}$), 含水构造极化率 $=0.42$, 第二层厚度 $=2.499$ m, 第三层厚度 $=0.271$ m, 第四层厚度 $=0.217$ m。推断在 K13+674—K13+671 存在含水构造, 开挖结果显示, 在 K13+673—K13+670 范围存在多处出水点, 与探测结果相符, 见图 10。

5 结 论

(1) 从拉普拉斯方程出发, 推导了全空间下隧道掌子面前方多个含水构造激发极化法超前探测的理论解公式, 采用等效电阻率法进行激发极化正演, 结果表明隧道空腔的存在对激发极化法视极化率的影响可以忽略不计, 仅从视极化率的正演曲线上解释判断隧道前方的含水构造情况是较为困难的。

(2) 基于隧道前方多个含水构造的理论解, 采用两个阻尼系数控制步长和搜索方向, 提出了一种改进的马奎特快速反演方法, 同时对视电阻率和激发极化数据进行反演, 可以定量的解释含水构造的位置和规模; 数值反演结果表明, 该方法对初始模型参数的依赖性较小, 收敛速度较快, 反演精度较高。

(3) 模型试验和现场应用表明, 探测结果较为符合模型和现场实际情况, 隧道含水构造激发极化法超前探测快速反演方法是行之有效的, 具有重要的工程意义。

参考文献:

[1] 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 Shu-cai, LI Shu-chen, ZHANG Qing-song, 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))

[2] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297 - 1307. (LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHANG Qing-song, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1297 - 1307. (in Chinese))

[3] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004(1): 7 - 9. (WANG Meng-shu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railroad Survey, 2004(1): 7 - 9. (in Chinese))

[4] 李永鸿, 徐光黎, 杨银湖, 等. 地震反射波法技术及其在隧道超前地质预报中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1180 - 1184. (LI Yong-hong, XU Guang-li, YANG Yin-hu, et al. Application of earthquake refracted wave method to geological prediction for tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1180 - 1184. (in Chinese))

[5] 常旭, 刘伊克, 桂志先. 反射地震零偏移距逆时偏移方法用于隧道超前预报[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1482 - 1488. (CHANG X, LIU Y K, GUI Z X. Zero offset reverse time migration for prediction ahead of tunnel face[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1482 - 1488. (in Chinese))

[6] 薛国强, 李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 894 - 900. (XUE G Q, LI X. The technology of TEM tunnel prediction imaging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 894 - 900. (in Chinese))

[7] 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): 2429 - 2436. (LI Tian-bin, MENG Lu-bo, 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): 2429 - 2436. (in Chinese))

[8] LAURENT Marescot, REGIS Monnet, DOMINIQUE Chapellier. Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps[J]. Engineering Geology, 2008, 98(2): 18 - 28.

- [9] MARTINHO E, ALMEIDA F, MATIAS M J Senos. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2007, **60**(1): 27 - 40.
- [10] FLORSCH Nicolas, LLUBES M, TEREYGEOL F, et al. Quantification of slag heap volumes and masses through the use of induced polarization: application to the Castel-Minier site[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, **38**(2): 438 - 451.
- [11] 黄俊革, 阮百尧, 王家林. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演[J]. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 619 - 624. (HUANG Jun-ge, RUAN Bai-yao, WANG Jia-lin. The fast inversion for advanced detection using DC resistivity in tunnel[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, **50**(2): 619 - 624. (in Chinese))
- [12] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 等. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(10): 3093 - 3101. (LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(10): 3093 - 3101. (in Chinese))
- [13] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 等. 基于预条件共轭梯度法的直流电阻率三维有限元正演研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(12): 1846 - 1853. (LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. 3D FEM numerical modeling of direct current electrical resistivity with FEM based on PCG algorithm[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(12): 1846 - 1853. (in Chinese))
- [14] 阮百尧, 村上裕, 徐世浙. 激发极化数据的最小二乘二维反演方法[J]. *地球科学*, 1999, **24**(6): 619 - 624. (RUAN Bai-yao, MURAKAMI Y, XU Shi-zhe. Least square 2-D inversion method for induced polarization data[J]. *Earth Science*, 1999, **24**(6): 619 - 624. (in Chinese))
- [15] OLDENBURG D W, LI Y. Inversion of induced polarization data[J]. *Geophysics*, 1994, **59**(9): 1327 - 1341.
- [16] LI Y, OLDENBURG D W. 3-D inversion of induced polarization data[J]. *Geophysics*, 2000, **65**(6): 1931 - 1945.
- [17] WELLER A, FRANGOS W, SEICHTER M. Three-dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste[J]. *Journal of Applied Geophysics* 2000, **44**: 67 - 83.
- [18] 吴小平. 利用共轭梯度方法的激发极化三维快速反演[J]. *煤田地质与勘探*, 2004, **32**(5): 62 - 64. (WU Xiao-ping. Rapid 3-D inversion of induced polarization data using conjugate gradient method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2004, **32**(5): 62 - 64. (in Chinese))
- [19] 岳建华, 刘树才. 矿井直流电法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. (YUE Jian-hua, LIU Shu-cai. *Underground mine electrical prospecting*[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [20] 冯思臣, 王绪本, 阮 帅. 一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, **39**(5): 594 - 599. (FENG Si-chen, WANG Xu-ben, RUAN Shuai. Comparison among several inversion algorithms of 1D MT[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, **39**(5): 594 - 599. (in Chinese))
- [21] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (WANG Jia-ying. *Inverse theory in geophysics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))