

基于高密度电阻率法的深部渗漏通道三维数值模拟与案例分析

李春婷¹, 闵刚¹, 刘康¹, 舒荣波², 司富豪¹, 孙浥钦¹

(1. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059;

2. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 成都 610041)

摘要: 在水库大坝、尾矿库、稀土矿原地浸等领域中存在的渗漏通道会造成水库大坝及尾矿库溃坝, 稀土矿山水土流失、山体崩塌, 严重危害人民的生命安全、破坏环境, 面对这些严峻形势, 生态文明建设迫在眉睫。在工程领域, 高密度电阻率法对断层、堤坝渗漏通道、煤矿采空区等具有良好的识别效果。笔者针对这类型的渗漏通道, 结合地质情况, 建立一系列三维模型, 对采用二极、三极、偶极-偶极、温纳、温纳-斯伦贝尔装置进行数值模拟和反演, 分析不同装置对渗漏通道的勘探效果。这对于用三维高密度电阻率法在水库大坝、尾矿库、稀土矿原地浸等领域的渗漏通道实际探测中具有一定的指导意义。在实际案例中, 采用先进资料处理技术高质量完成实测数据的处理解释, 建立工区地下三维电阻率结构模型, 经过后期钻孔验证, 反演结果有效地识别了渗漏通道、孤石以及风化层残积物, 为工区正常运转及环境保护提供重要参考。

关键词: 渗漏通道; 高密度电阻率法; 三维模型; 数值模拟; 三维成像

中图分类号: P631.322

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.11

0 引言

国家早期建立的水库大坝, 由于受到多种因素的影响, 水库渗漏是水库常见病害之一, 渗漏通道的发育间接影响着大坝坝体安全^[1-2]。建造尾矿库的目的是储存金属或非金属矿山在矿石筛选后排出的尾矿和其他工业废渣。随着尾矿库规模和高度的增加, 尾矿库具有极高的重力势能, 一旦发生溃坝, 这会对公民的生命财产安全造成极大的破坏^[3]。稀土矿原地浸的过程中由于要给山体注液, 注井液极易从渗漏通道流失, 从而造成山体滑坡, 并对环境造成破坏。查明地下渗漏通道的空间位置及其展布特征, 对保护环境以及人民生命财产安全有重要意义。我国高密度电阻率法工作者在介绍高密度电阻率法

时通常采用直译方式——high density electrical method, 但是高密度电阻率法实际上是阵列勘探思想, 所以国外大多数使用 multi-electrode resistivity survey。80年代中期日本地质计测株式会社设计出早期高密度电阻率法野外采集仪器, 随着计算机与物探技术的高速发展, 它的优点被越来越多的学者发现, 由原先的三种电极排列方式发展至十几种, 高密度电阻率法的勘探能力明显提高, 效率大大增加^[4]。目前, 高密度电阻率法已经发展为水文地质、工程与环境物探等地质工程勘探中的重要手段^[5-9]。近年来在环境地质和地质灾害评估等领域也取得了较好的应用效果^[10]。

即便二维高密度电阻率法的应用已经十分成熟, 但其多解性问题仍旧存在^[11-13]。三维高密度电阻率法能够直观反映地下地质体结构, 有效避免二

收稿日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930112)

第一作者: 李春婷(1999—), 女, 硕士, 主要从事电法勘探相关研究, E-mail: 2454982760@qq.com。

通信作者: 闵刚(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电法勘探原理及应用研究, E-mail: mg-s1983827@163.com。

维解释的弊端^[14]。高密度电阻率法的几种装置都能够反映出地下低阻异常,但是低阻体形态(横向边界和纵向埋深)易受到地层不均匀性影响而变形,低阻地层会强化目标体的异常响应,而高阻地层则会弱化响应^[15]。国内外学者对三维高密度电阻率法可视化做了大量研究,能够直观展示地下结构,应用价值高^[16-17]。单独的二维电阻率反演剖面很难确定渗漏通道的原因和路径,通过改进的 ERT 建立的三维反演模型能够可靠的推断渗漏通道的路径^[17]。于文福^[18]认为正反演时最小均方差模型不一定是符合实际地质情况;黄真萍等^[19]建立多种地质模型,通过数值模拟对比得到最优的正反演模拟参数,能够提高反演分辨率和精度,从而使得到的地质结构信息更丰富、更精确;朱瑞等^[20]利用三维高密度电阻率法成功探测了豫北某拟建水库坝址的

隐伏断层。以渗漏通道探测为例,针对不同电性特征的地质结构建立地电模型,进行有限元正演和最小二乘反演计算,探讨各装置的应用效果和有效性,为精确解译离子型稀土矿区渗漏通道提供了可靠的理论依据,并取得了较好的应用效果。

1 高密度电阻率法基本原理

高密度电阻率法是从直流电阻率法发展过来的,只是其相较于传统直流电法,改进了勘探方法,使得数据采集更加高效、自动。直流电阻率法基于地下岩矿石的电性差异,通过观测和计算人工加入的稳定电流场的分布来达到探测目标体的空间分布或找矿等地质问题^[21-22],测量方式如图 1 所示。

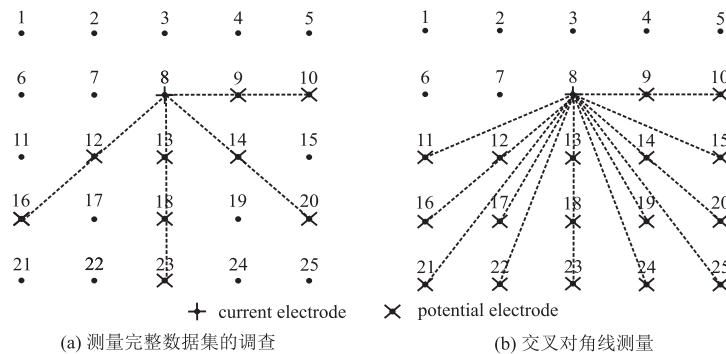


图 1 两种三维高密度电法测量方式

Fig. 1 Two methods of 3-D multi-electrode resistivity survey measurement

1.1 高密度电阻率法正演基本原理

在直流电阻率法勘探研究中,根据地质体的形状、空间分布及其电阻率大小等参数,以建立数学模型的方式,计算得到其理论值。在计算机高速发展的情况下,数值分析是求解地下复杂条件下电场分布规律的有效手段。实际地下介质是不均匀的,各向异性的,正演主要是研究理论上地电模型电场分布的情况。主流的数值模拟方法有有限元法和有限差分法。

有限元法和有限差分法这两种方法都是将求解的区域划分为有限个网格进行近似求解。那么这两种方法最根本的区别在于有限差分法是利用级数概念,将本来连续的函数离散化,网格中的节点就是级数中的一个取值点,这样以级数和的形式得到最终解,解是近似解,余项是误差。有限元法是利用插值的原理,将每个网格都进行求解,这样就能得到许多个解,这些解的集合构成整体函数的解。在地球物

理勘探中,从方法上看,有限差分法要比有限元法精确一些。这里的数值模拟采用的是有限差分法。

1.1.1 有限差分法

利用有限差分法进行正演模拟时,首先是将求解区域网格化,当网格无限小,就可以得到一个节点其四周相邻节点的电位在该节点的泰勒级数^[23]。有限差分法的一二阶差分情况如下:

精度:

一阶差分:

$$\text{前向差分} \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (1)$$

$$\text{后向差分} \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f(x) - f(x-h)}{h} \quad (2)$$

$$\text{中心差分} \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f\left(x + \frac{h}{2}\right) - f\left(x - \frac{h}{2}\right)}{h} \quad (3)$$

精度:

一阶精度:

$$f(x+h) = f(x) + h \frac{df(x)}{dx} + \frac{1}{2!} h^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \quad (4)$$

$$f(x-h) = f(x) - h \frac{df(x)}{dx} + \frac{1}{2!} h^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \dots \quad (5)$$

二阶精度:

$$f(x+h) - f(x-h) = 2h \frac{df(x)}{dx} + \frac{2}{3!} h^3 \frac{d^3 f(x)}{dx^3} + \dots \quad (6)$$

二阶差分:

$$\text{前向差分 } \frac{\Delta^2 f(x)}{\Delta x^2} = \frac{1}{\Delta x} \frac{\Delta f(x+h) - \Delta f(x)}{\Delta x} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{f(x+h) - f(x)}{h} - \frac{f(x) - f(x-h)}{h} \right) \quad (8)$$

中心差分

$$\frac{\Delta^2 f(x)}{\Delta x^2} = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (9)$$

精度:

三阶精度:

$$f(x+h) - f(x-h) = 2f(x) + h^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \frac{2}{4!} h^4 \frac{d^4 f(x)}{dx^4} \quad (10)$$

一般求得二阶差分中的中心差分,就是其邻近四周点的电位所满足的微分方程。

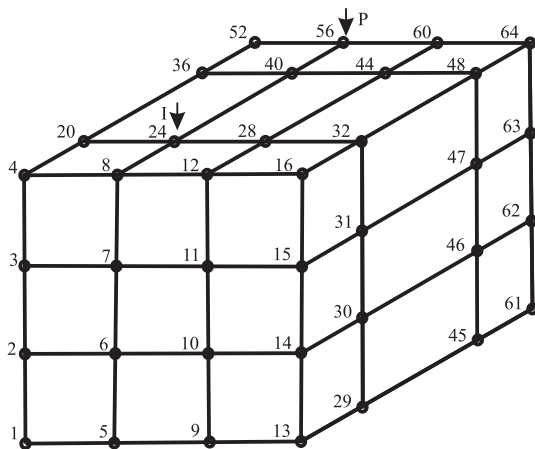


图 2 三维网格剖分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a 3-D mesh

1.2 高密度电阻率法反演基本原理

反演有许多种方法,用基于圆滑约束的最小二乘法进行反演,在计算时间和效率上优于其他方法^[24]。在正演模型中加入电阻率结构估计值,提高反演精度^[25]。反演使用的最小二乘法是一种数学优化技术。它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。利用最小二乘法可以简便地求得未

知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。如果达不到设置的误差,最小二乘法就会不断地修正参数,直到满足误差。一般来说反演分三步:①预处理;②划分网格;③反演分析^[26]。

1.2.1 最小二乘法

19 世纪勒让德就提出“误差的平方和最小”,所估计出来的模型也就是最接近真实情况的。最小二乘法在函数拟合和求函数极限方面应用颇多。最小二乘法原理的一般形式简单^[5],如下:

$$\text{目标函数} = \sum (\text{观测值} - \text{理论值})^2$$

观测值就是在野外采集的数据值,理论值就是假设的拟合函数。目标函数也就是在机器学习中常说的损失函数,目标是得到使目标函数最小化时候的拟合函数的模型。

非线性最小二乘法是回归算法中的基础算法:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(x))^2 = \frac{1}{2} \mathbf{f}(x)^T \mathbf{f}(x) \quad (11)$$

对 $f(x)$ 进行泰勒展开:

$$f(x+h) = f(x) + \mathbf{J}(x)h + O(\|h\|^2) \quad (12)$$

$\mathbf{J}(x)$ 为雅克比矩阵,且 $\mathbf{J} \in R(m \times n)$ 。雅克比矩阵表示如下:

$$\mathbf{J}(x)_{ij} = \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \quad (13)$$

对公式(11)求导:

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^m f_i(x) \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \quad (14)$$

$F(x)$ 的梯度:

$$\mathbf{g} = \mathbf{F}'(x) = \mathbf{J}(x)^T \mathbf{f}(x) \quad (15)$$

考虑 $F(x)$ 的二阶 Hessian 矩阵:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{F}(x)}{\partial x_j \partial x_k} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_k} + f_i(x) \frac{\partial^2 f_i(x)}{\partial x_j \partial x_k} \right) \quad (16)$$

如果用雅克比矩阵来表示:

$$\mathbf{H} = \mathbf{F}''(x) = \mathbf{J}(x)^T \mathbf{f}(x) + \sum_{i=1}^m f_i(x) f_i''(x) \quad (17)$$

对于一个二元一次方程组,如果只有两组方程,则其解是唯一的,但是由于存在观测误差,就得做更多的观测,所以当有三组及以上的方程时,方程的解就不唯一。虽然不可能得到唯一的真实解,退而求其次,可以得到一个最接近真实解的解,而这个解就是原方程的最小二乘解。软件所使用的是基于光滑约束的最小二乘法。

光滑约束最小二乘法^[4]:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mathbf{uF})\mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (18)$$

式中: \mathbf{J} 是偏微分矩阵; \mathbf{J}^T 是 \mathbf{J} 的置换矩阵; \mathbf{u} 为阻尼因子; \mathbf{d} 为模型扰动向量; \mathbf{g} 为测量视电阻率与计算视电阻率的对数差的差异矢量; $\mathbf{F} = \mathbf{f}_x \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \mathbf{f}_z^T$; \mathbf{f}_x 为水平光滑滤波系数矩阵; \mathbf{f}_z 为垂直光滑滤波系数矩阵。

非线性最小二乘一般是没有解析解的, 所以只能迭代求解。而一般的优化方法也能用于非线性最小二乘的求解, 但是效率比较慢。还有其他反演方法可以使用, 例如高斯-牛顿法, 列文伯格-马夸尔特法等。

2 三维数值模拟

目前在野外实际工作中, 二维高密度勘探还是占主导地位, 但实际地质体是三维的, 二维高密度电

阻率法不能直接反映地下结构, 因此三维高密度电阻率法的发展与广泛应用是必然的。

此次三维数值模拟使用高密度电阻率法 Res3dmod 进行正演, 使用 Res3dinv 软件中最小二乘法进行反演。根据实际地质情况建立一系列三维模型。三维地电模型使用 Surfer 来展示, 可以更加直观清晰地看到地下情况三维分布, 反演结果使用 Voxler 成图软件进行可视化处理^[25]。

三维模型 1 的情况如图 3 所示。地表有电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 、2 m 厚的土壤层, 其下一直到基岩面都是电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 的碎石压实层, 基岩电阻率设置为 $3000 \Omega \cdot \text{m}$, 地表放置了两个电阻率为 $6000 \Omega \cdot \text{m}$ 的孤石, 低阻体高 30 m, 宽 10 m, 长 145 m, 电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 。

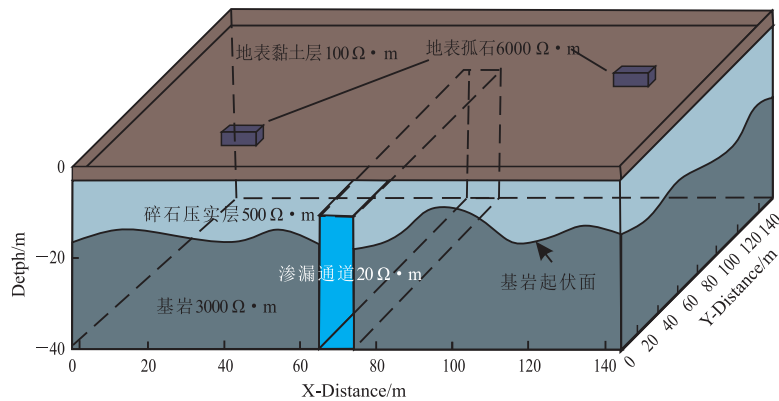


图 3 三维模型 1

Fig. 3 The 3-D model 1

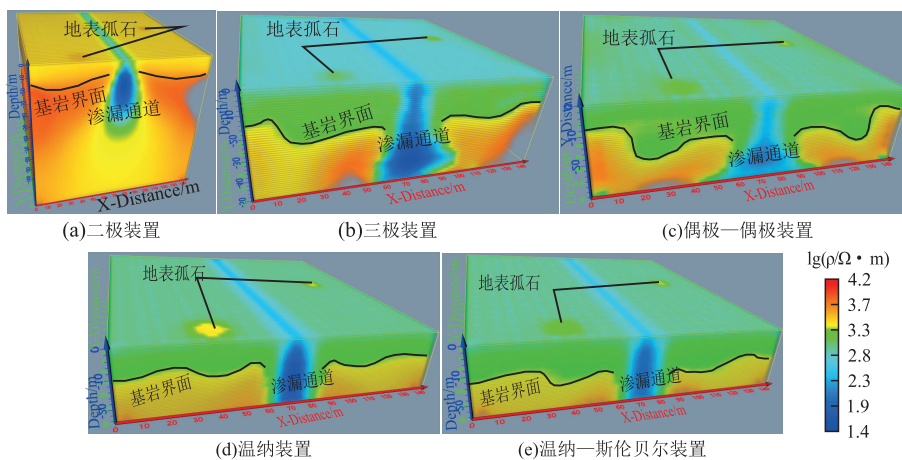


图 4 三维模型 1 不同装置反演图

Fig. 4 Inversions of different devices in the 3-D model 1

将模型 1 分别用二极装置、三极装置、偶极-偶极装置、温纳装置、温纳-斯伦贝尔装置进行正演,

并用正演数据进行反演, 最后在 Voxler 软件中成图, 得到的反演结果如图 4 所示。

从反演结果图上可以很直观地看出二极装置、三极装置、偶极-偶极装置、温纳装置、温纳-斯伦贝尔装置对模型 1 中的地表孤石、地下渗漏通道及地下基岩起伏界面都能够识别。三维数值模拟时,二极装置正演计算得到的数据量最大,反演完成后其探测深度最大,但是其对表层孤石、基岩起伏界面的识别效果不明显且对深部的识别较为混乱,分辨率低;三极装置相较于二极装置对表层孤石的识别效果增强,但是其识别基岩起伏界面的能力不足,三极装置对渗漏通道空间位置的识别能力略逊于其他

装置;偶极-偶极装置对异常体的识别较为明显,但是其对于两边的识别效果不明显,形态相对其他装置有所偏离;温纳装置和温纳-斯伦贝尔装置在这 5 种装置中的综合效果最好,能够良好地反映地表孤石、低阻体、基岩起伏界面,也能够明显划分地表土壤层。

相对模型 1 来说,模型 2(图 5)增加了两个不同规模的渗漏通道,其中右侧新增的渗漏通道要更浅一些,而左侧新增的则是要小一些。电阻率值保持不变,为 $20 \Omega \cdot m$ 。

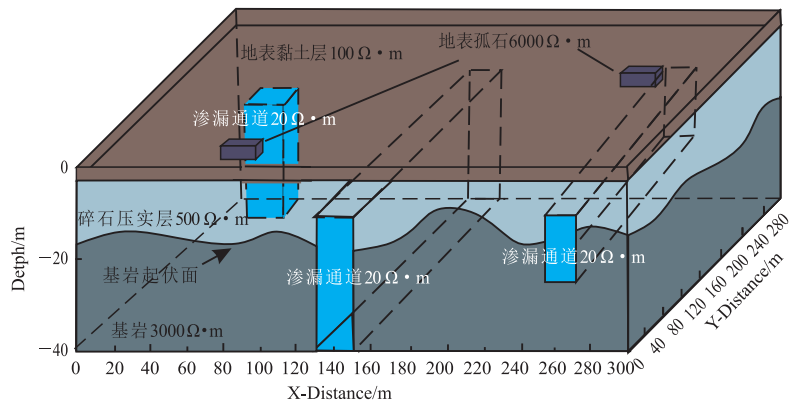


图 5 三维模型 2
Fig. 5 The 3-D model 2

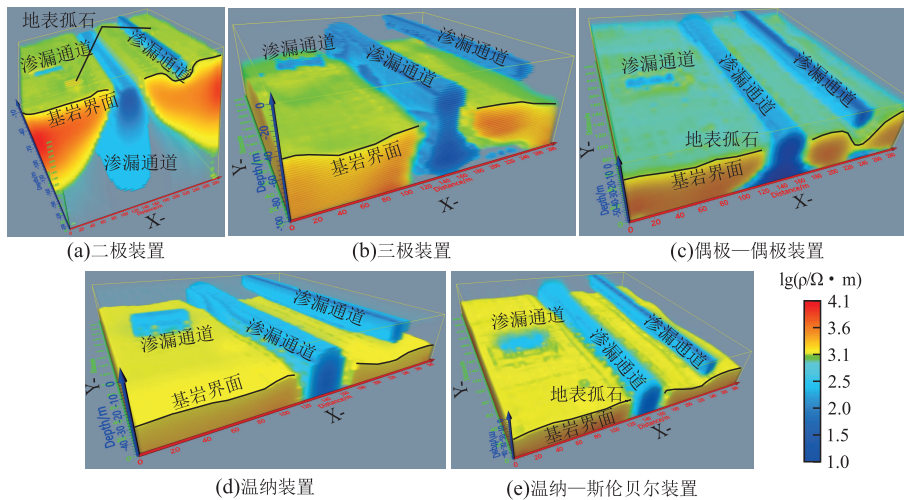


图 6 三维模型 2 不同装置反演图
Fig. 6 Inversions of different devices in the 3-D model 2

模型 2 中新加入了两个低阻体,可视化时选择高阻和低阻显示。图 6 中显示 5 种装置对渗漏通道的识别效果明显,但是细节部分有明显的区别,例如对地表孤石的识别,在二极装置中孤石还能识别为高阻体,但是其他装置中地表孤石的影响则没有明显体现;对基岩面和渗漏通道的识别,温纳装置和温

纳-斯伦贝尔装置在渗漏通道范围的约束情况中表现良好。

图 7 是单通道模拟。左图是固定测线 X, Y 方向,长 300 m,由上到下电极道数减少,右图是固定 30×30 电极道数,用增加电极距的方式增加测线长度。左图电极道数增加时,能够稍微增加勘探深度,

小电极距相比大电极距有着更加准确丰富的地电信息。这是因为电极密度越高,获得的信息越多,反演结果一般会更精细。右图为固定电极道数,增大电极距。当电极距为 5 m 的时候,勘探深度只有 25 m,能够识别出地表土壤层,可以略微看到渗漏通道,但是其渗漏通道的展布及地下基岩起伏界面则完全不

显示;当电极距增大到 8 m 时,勘探深度到达 40 m,其对基岩起伏界面和渗漏通道的识别相较于 5 m 电极距均有了明显的提高;电极距增大到 10 m 时,勘探深度为 50 m,可以看出其分辨率有所降低。虽然增大了电极距,但是电极分布稀少,获得的信息变少,降低分辨率。

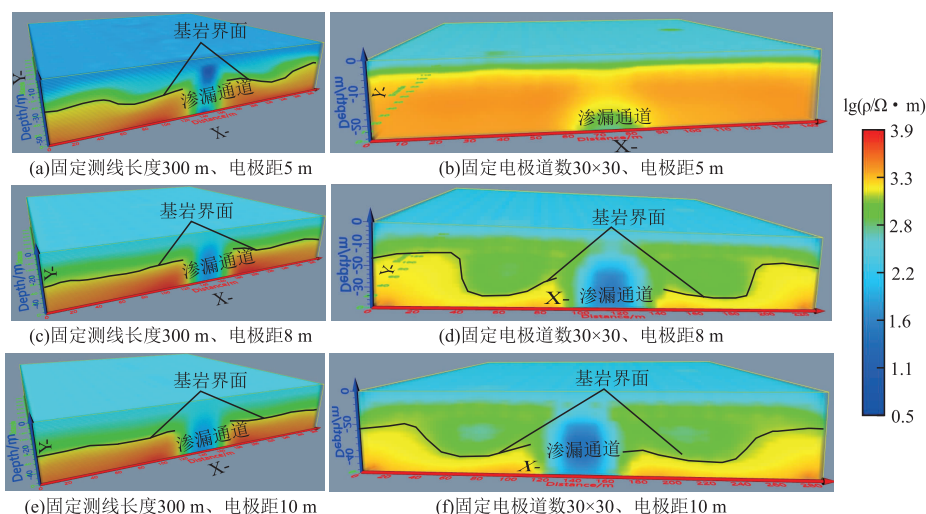


图 7 三维模型 2 不同电极距反演对比

Fig. 7 Inversions of different electrode spacing in the second 3-D model



图 8 测线布置分布图

Fig. 8 Location of the resistivity survey lines in the study area

通过数值模拟研究表明,利用三维高密度电阻率法对离子型稀土矿山的渗漏通道进行勘探是可行的,装置对比结果显示三极装置和偶极-偶极装置对浅部低阻体勘探较为灵敏;温纳装置和温纳-斯伦贝尔装置的对比区别不是很大,对于高、低阻体的识别都有良好的效果,且小电极距相比大电极距有

着更加准确丰富的地电信息。

3 工程实例

矿区位于福建省长汀县河田镇西南约 7 km 处,隶属长汀县河田镇中坊村和根溪村管辖。地质

构造不发育,地表未发现有明显的断裂构造,地质构造主要表现为岩体的节理及裂隙;勘探区花岗岩基岩较完整,在勘探区的南侧水坝沟谷出露基岩;勘探区地层不发育,主要为第四纪冲洪积地层与第四纪残坡积地层,第四纪冲洪积地层主要岩性有黏土、粉质黏土、细砂及卵石;第四纪残坡积地层主要岩性为残积砂(砾)质粘性土,为花岗岩风化残留的产物,局部地段风化较不完全,主要为山脊线、山顶等处,风化残留较多,残留基岩多呈透镜体状。在稀土矿的开采过程中,渗漏通道的存在会使硫酸铵溶液流失,污染周边环境和水源,严重情况下造成山体破坏,而孤石的存在则是会影响钻孔,带来经济上的损失。勘探区亟待解决的是查明渗漏通道的空间展布以及识别地下孤石群。

三维高密度电阻率法数值模拟展示了不同装置对不同地质情况的效果。针对工区实际情况,此次勘探选择的是温纳装置。为有效查明这些地质问题,我们结合工区实际地质情况,设计测线分布如图 8 所示:

在测区 X 方向 25 m~75 m, Y 方向 30 m~35 m 左右,在 X 方向 75 m~90 m, Y 方向 0 m~30 m 左右,地表至地下 15 m 范围内均为高阻特征。经实地调查,这里为地面有出露的孤石带,推测地下高阻

特征为孤石的综合影响。风化碎石层在 0 m~15 m 的深度,大部分范围呈现高阻特征,推测是地下孤石的综合影响。在地面有小范围的低阻特征,推测是地下孤石群,起阻挡作用,使地表风化碎石层含水较高。在 X 方向 5 m~20 m 左右, Y 方向 0 m~30 m 左右从地表至地下 25 m 呈现高阻特征,实地调查,该区域为山顶,地面无出露孤石,推测地下有体积较大孤石的综合影响。通过 Voxler 软件进行不同深度切片,发现中间处有低阻向下延伸带,经钻井验证后得知此处岩石较为破碎,推断为渗漏通道。

钻孔位置 1 与钻孔位置 2 在反演图(图 9)上位于推断渗漏通道的两侧。从三维反演结果图可以看出,钻孔 1 总体位于破碎带的影响范围之内,在其左侧发育完整的基底构造,故而设计该钻孔,钻孔 1 靠近破碎带边缘且偏向破碎带一侧,是为了落实完整岩体与破碎带的边界位置;另外,在钻井下方破碎带内部深度 25 m 左右发育横向连通性较好的相对高阻异常,钻孔 1 也能够验证其是否存在;钻孔 2 位于推断渗漏通道右侧,同样的道理,从反演结果图可以看出,钻孔 2 位置总体位于破碎带的影响范围之内,在钻孔 1 的前提下,钻孔 2 靠近破碎带边缘且偏向基岩一侧,是为了进一步落实破碎带的边界位置。

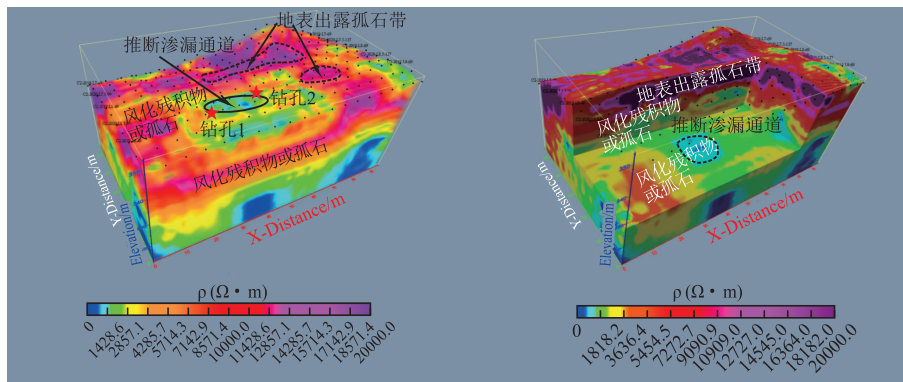


图 9 三维勘探成果图

Fig. 9 3-D multi-electrode resistivity survey inverse imaging



图 10 钻孔 1 岩心

Fig. 10 Drilling 1 rock core



图 11 钻孔 2 岩心

Fig. 11 Drilling 2 rock core

4 讨论

在野外实地工作中,地形往往是起伏变化的。本次模拟旨在选取最佳勘探渗漏通道的装置,尚未考虑地形变化,接下来会进行带地形约束的正反演,以便更准确地模拟实际地质情况。除此之外,二极装置效果较好的全测量方式未能在文章中体现,其效果还应该进一步研究。

地电模型的响应在反演结果中得到很好的刻画。从模型 1 和模型 2 反演结果图的对比看,二极装置对于异常体的识别效果整体变化不大,只是其低阻体的形态相对变大,其对基岩起伏界面没有良好的识别效果;三极装置和偶极-偶极装置的低阻体形态下半部分有所变形,说明三极装置和偶极-偶极装置对浅部低阻体勘探较为灵敏;温纳装置和温纳-斯伦贝尔装置的对比区别不是很大,总体来看,温纳装置对于高低阻体的识别都有良好的效果。通过模拟能够得出 5 种装置各自的优缺点,即二极装置有最大的勘探深度但是其分辨率比较低,三极装置和偶极-偶极装置对于深部低阻体的识别灵敏度不高,温纳装置和温纳-斯伦贝尔装置对基岩起伏和高低阻体的识别情况较好。

在固定电极道数的情况下,不同电极距对基岩起伏差异的识别情况不同。在其探测深度能够达到模型中基岩深度时候的情况最真实,所以在解释野外实测的资料时,要根据钻井资料多方位解释,若是只凭借一种方式,是不合理且可信度不高的。综上所述,二维勘探深度理论同样适合三维勘探深度,都是能够达到测线长度的 $1/6 \sim 1/4$,在野外实际测量时候,不仅要选择合适的电极道数,也要选择合适的电极间距,既要满足科研生产的需要,同时也要考虑经费问题。

5 结论

1) 高密度电阻率法进行有效探测的前提条件是不同地质体之间具有一定的电性差异。此次数值模拟表明,高密度电阻率法几种装置均可对地下渗漏通道进行定性探测。同时,三维高密度电阻率法可以直观反映出渗漏通道的空间展布特征,存在很好的应用前景。

2) 数值模拟得到的反演结果表明二极装置虽然有更大的勘探深度,但是明显假异常偏多,而二极、

三极、偶极-偶极装置的勘探效果明显不如温纳、温纳-斯伦贝尔装置,这跟装置的跑极方式有关。固定电极道数,改变电极距后,其 X、Y 方向的长度加大,其勘探深度也随之加大。总体来看,温纳装置和温纳-斯伦贝尔装置对基岩起伏和高、低阻体的识别情况较好。且小电极距相比大电极距有着更加准确丰富的地电信息。

3) 离子型稀土矿山渗透通道三维高密度电阻率法勘探结果较好地揭示了风化层的厚度、局部风化残留物的位置以及基岩破碎带的分布位置,这些解释结果得到了钻井验证。研究成果说明高密度电阻率法对离子型稀土矿区底板花岗岩上发育的破碎带有较好的勘探效果,在离子型稀土矿区深部渗漏通道调查中,是一种效率高、效果好的地球物理勘探方法。

参考文献:

- [1] 谢国华. 水库大坝安全监测浅析[J]. 水利工程, 2012, 12(7): 171-172.
XIE G H. Analysis of dam safety monitoring [J]. Hydraulic Engineering, 2012, 12(7): 171-172. (In Chinese)
- [2] 李智源. 高密度电法在水利水电工程地质勘察中的应用[J]. 工程与建设, 2023, 37(4): 1129-1131.
LI Z Y. Application and analysis of high-density electricity method in geological investigation of water conservancy and hydropower engineering[J]. Engineering and Construction, 2023, 37(4): 1129-1131. (In Chinese)
- [3] 杜艳强, 刘炳君, 谢冰, 等. 金属矿山尾矿库溃坝诱因分析及对策[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(9): 81-83.
DU Y Q, LIU B J, XIE B, et al. Inducement analysis and countermeasures of dam break in tailings pond of metal mine [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(9): 81-83. (In Chinese)
- [4] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
DONG H B, WANG C L. Development and application of 2d resistivity imaging surveys [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 171-176. (In Chinese)
- [5] 刘国兴. 电法勘探原理与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
LIU G X. Principles and methods of electrical prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (In Chinese)
- [6] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社,

- 2005.
- LI J M. Geoelectric field and electrical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (In Chinese)
- [7] 孟永东, 张伟杰, 蔡征龙, 等. 滑坡体降雨入渗的高密度电法模型试验研究[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1842—1852.
- MENG Y D, ZHANG W J, CAI Z L, et al. Experimental study of rainfall infiltration on the landslide model using high density resistivity method[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4): 1842—1852. (In Chinese)
- [8] 黄小伟. 高密度电法在赣东地区矿泉水勘查中的应用有效性分析[J]. 能源研究与管理, 2023(2): 127—132.
- HUANG X W. Efficiency analysis of application of high density electric method in mineral water exploration in eastern Jiangxi[J]. Energy Research and Management, 2023(2): 127—132. (In Chinese)
- [9] 赵钊, 孟庆生, 韩凯, 等. 基于高密度电阻率法的近地表工程岩体速度结构成像[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(6): 742—747.
- ZHAO Z, MENG Q S, HAN K, et al. Velocity structure imaging of near-surface engineering rock mass based on high-density resistivity method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(6): 742—747. (In Chinese)
- [10] LOKE M H, CHAMBERS J E, RUCKER D F, et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 95: 135—156.
- [11] 胡静云, 李庶林, 林峰, 等. 特大采空区上覆岩层地压与地表塌陷灾害监测研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1117—1122.
- HU J Y, LI S L, LIN F, et al. Research on disaster monitoring of overburden ground pressure and surface subsidence in extra-large mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1117—1122. (In Chinese)
- [12] 叶懿尉, 王汉勋, 耿招. 公路隧道穿越铁矿采空区围岩稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(S1): 196—201.
- YE Y W, WANG H X, GENG Z. Stability analysis of surrounding rock of highway tunnel passing through mined-out area of iron mine [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2018, 26(S1): 196—201. (In Chinese)
- [13] DI Q Y, WANG R, WANG M Y. Application and prospect of fine detection in xiong-an new area by electrical method[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 137—144.
- [14] 董浩斌, 王传雷. 浅议高密度电法几个问题[J]. 地质与勘探, 2003: 6.
- DONG H B, WANG C L. Discussion on Several Problems of Multi-electrode Resistivity Survey [J]. Geology and Exploration, 2003: 6. (In Chinese)
- [15] 陈实, 李振宇, 潘建伟, 等. 基于高密度电法的煤炭采空区数值模拟及应用[J]. 新疆地质, 2018, 36(2): 189—193.
- CHEN S, LI Z Y, PAN J W, et al. The numerical simulation and application of coal goaf based on high density resistivity method [J]. Xinjiang Geology, 2018, 36(2): 189—193. (In Chinese)
- [16] VAN HOORDE M, HERMANS T, DUMONT G, et al. 3D electrical resistivity tomography of karstified formations using cross-line measurements[J]. Engineering Geology, 2017, 220: 123—132.
- [17] LEE B M, OH S, YI M J. Mapping of leakage paths in damaged embankment using modified resistivity array method [J]. Engineering Geology, 2020, 266: 105469.
- [18] 于文福. 高密度电阻率法正、反演模拟及其应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- YU W F. Forward and inverse simulation of high density resistivity method and its application[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (In Chinese)
- [19] 黄真萍, 胡晓娟, 孙艳坤. 三维高密度电法正反演模拟阻尼系数最优设置研究[J]. 路基工程, 2014(1): 5—10.
- HUANG Z P, HU X J, SUN Y K. Study on forward and inverse modeling of optimum settings of damping coefficient by 3D high density resistivity method[J]. Subgrade Engineering, 2014(1): 5—10. (In Chinese)
- [20] 朱瑞, 李朝辉, 时向阳, 等. 三维高密度电法在隐伏断层探测中的应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 106—109.
- ZHU R, LI Z H, SHI X Y, et al. Application of 3D electrical resistivity tomography to buried fault detection[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 106—109. (In Chinese)
- [21] 王艳龙, 杜立志, 蒋华中, 等. 三维高密度电阻率法偶极装置分辨率研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(1): 49—61.
- WANG Y L, DU L Z, JIANG H Z, et al. Study on resolution of three-dimensional high-density resistivity dipole device[J]. Computing Techniques for Geophysi-

- cal and Geochemical Exploration, 2021, 43(1): 49—61. (In Chinese)
- [22] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 黄土湿陷过程中微结构变化规律的电阻率法定量分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1692—1698.
ZHA F S, LIU S Y, DU Y J, et al. Quantitative assessment on change in microstructure of loess during collapsing using electrical resistivity measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1692—1698. (In Chinese)
- [23] 童孝忠, 谢维, 温建亮, 等. 偏微分方程的有限差分法及地球物理应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2019.
TONG X Z, XIE W, WEN J L, et al. Numerical solution of partial differential equations with finite difference method and application in geophysics[M]. Changsha: Central South University Press, 2019. (In Chinese)
- [24] LOKE M H, BARKER R D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion 1[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(3): 499—523.
- [25] WILKINSON P B, UHLEMANN S, CHAMBERS J E, et al. Development and testing of displacement inversion to track electrode movements on 3-D electrical resistivity tomography monitoring grids[J]. Geophysical Journal International, 2015, 200(3): 1566—1581.
- [25] 毕鹏程, 车爱兰, 冯少孔. 基于三维电测量的复杂地质构造识别及参数估计方法[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 887—895.
BI P C, CHE A L, FENG S K. Complex geological structure identification and parameter estimation method based on 3d resistivity measurement[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 887—895. (In Chinese)
- [26] 徐佳, 朱鲁, 翟培合. 基于 Voxler 平台的电法数据体三维可视化[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(6): 772—775.
XU J, ZHU L, ZHAI P H. The 3D visualization interpretation of electrical data based on the voxler platform[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(6): 772—775. (In Chinese)

Three-dimensional numerical simulation and case analysis of deep leakage channel based on multi-electrode resistivity method

LI Chunting¹, MIN Gang¹, LIU Kang¹, SHU Rongbo², SI Fuhao¹, SUN Yiqin¹

(1. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: The leakage channels existing in the fields of reservoir dams, tailings reservoirs, and in-situ leaching of rare earth minerals will cause dam failure of reservoir dams and tailings reservoirs, soil erosion, and mountain collapse of rare earth mines, seriously endangering people's life safety and destroying the environment. In these severe situations, the construction of ecological civilization is imminent. In engineering, multi-electrode resistivity method has a good recognition effect on faults, dam leakage passages, coal mine goaf, etc. In this paper, a series of three-dimensional models are established for this type of leakage channel, combined with the geological conditions, and the numerical simulation and inversion of the two-pole, three-pole, dipole-dipole, Wenner and Wenner-Slunber devices are carried out to analyze the exploration effect of different devices on the leakage channel. This has particular guiding significance for detecting leakage channels in reservoir dams, tailings reservoirs, and in-situ leaching of rare earth mines using three-dimensional high-density resistivity methods. In the actual case, the advanced data processing technology is used to complete the processing and interpretation of the measured data with high quality, and the underground three-dimensional resistivity structure model of the work area is established. After the later drilling verification, the inversion results effectively identify the leakage channel, boulder, and weathering layer residue, which provides an essential reference for the regular operation and environmental protection of the work area.

Keywords: leakage channel; multi-electrode resistivity method; three-dimensional model; numerical simulation; three-dimensional imaging