

DOI: 10.11779/CJGE201503008

基于跨孔电阻率 CT 的地铁盾构区间孤石探测方法及物理模型试验研究

李术才, 刘征宇, 刘 斌, 许新骥, 王传武, 聂利超, 孙怀凤, 宋 杰, 王世睿

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 跨孔电阻率 CT 方法在地铁盾构区间孤石探测方面具有一定优势, 但仍然存在孤石定位精度低、小尺寸孤石难以识别等工程实际难题。首先, 提出了电阻率 CT 不等式约束反演成像方法和偏导数矩阵的并行解析快速求解方法, 从施加先验信息约束和提高反演精度两个方面共同改善了电阻率 CT 反演的多解性与成像效果。在此基础上, 通过大量常规观测模式的成像效果对比试验, 提出了一种组合式观测模式, 可以综合多种常规观测模式的探测优势并增加采集的数据量, 从而提高对异常体的识别能力。针对影响探测效果的两个因素——孔距和电极间距进行了数值模拟试验研究, 获得了在组合式观测模式下的有效孔距范围和合理的电极间距参数, 并进一步检验了对小粒径孤石的识别效果。在此基础上, 提出了地面物探普查与电阻率 CT 详查相结合的孤石探测方案。最后, 开展了物理模型试验研究进行验证, 探测结果与实际情况比较一致, 具有较好的应用前景。

关键词: 地铁盾构区间; 孤石; 跨孔电阻率 CT; 不等式约束; 组合式观测模式; 影响因素

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)03-0446-12

作者简介: 李术才 (1965 -), 男, 河北涞水人, 教授, 博士生导师, 从事地下工程灾害防治与超前地质探测方面的教学与研究。E-mail: lishucai@sdu.edu.cn。

Boulder detection method for metro shield zones based on cross-hole resistivity tomography and its physical model tests

LI Shu-cai, LIU Zheng-yu, LIU Bin, XU Xin-ji, WANG Chuan-wu, NIE Li-chao, SUN Huai-feng, SONG Jie, WANG Shi-rui

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

Abstract: The cross-hole resistivity tomography method has certain advantages in boulder detection in metro shield zones, but some practical engineering problems, such as low location accuracy and difficult identification of small-size boulders, still exist. First of all, the inequality constrained inversion imaging method and the parallel analytical fast solving method for partial derivative matrix are proposed for reducing the multiple solutions and improving the imaging results in cross-hole resistivity inversion. On this basis, a combined detection mode is raised from numerous results of inversion imaging comparison experiments by routine detection modes. The advantages of various routine detection modes and the collected data amount are integrated in this mode, which is good for improving the recognition ability of abnormal bodies. Then, numerical simulation tests for borehole distance and electrode spacing which affect the detection results are performed. Under the combined detection mode, the effective range of borehole distance and the reasonable electrode spacing parameters are obtained. Further tests on the identification effects of small-size boulders are carried out. On this basis, the boulder detection scheme, which combines the ground geophysical screening and cross-hole resistivity tomography detection, is put forward. Finally, physical model tests are carried out to verify this method. The detection results are almost the same with the actual situation, so the proposed method has good application prospects.

Key words: metro shield zone; boulder; cross-hole resistivity tomography; inequality constrained inversion; combined detection mode; factor

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB036002, 2014CB046901, 2015CB058101); 国家重大仪器设备研制专项项目 (51327802); 国家自然科学基金重点项目 (51139004); 国家自然科学基金面上项目 (51479104); 国家十二五科技支撑计划 (2013BAK06B01)

收稿日期: 2014-01-17

0 引 言

近年来, 中国城市地铁工程建设迎来了宝贵的机

遇期和建设高潮。在地铁施工过程中, 盾构掘进机施工方法逐渐成为我国地铁工程建设的重要趋势。盾构掘进机施工具有“掘进速度快、施工扰动小、成洞质量高、综合经济效益高、施工安全文明”的优点, 但其对地层的适应性较差。地铁工程勘察中发现, 盾构掘进机在长距离掘进过程中经常遇到“孤石群地层”, 特别是在中国广州、深圳、长沙地铁施工中较为常见。未探明的孤石群会给地铁盾构施工带来重大安全隐患, 不仅导致盾构刀盘频繁被卡甚至严重变形, 延误工期造成巨大经济损失, 严重时还会导致工作面喷涌、塌方, 引起突发地质灾害。因此, 在盾构掘进前, 尽可能准确地探查清楚掘进区域地铁隧洞洞身范围内孤石群的赋存状态, 是地铁盾构工程施工过程中迫切需要解决的难题。

钻探和物探方法是探测孤石的重要手段。钻探可以直观地揭露地铁盾构区间局部点位的地下球状风化体的竖向大小、赋存位置、表现形式等信息, 但对于连续区域的探查则具有“一孔之见”的局限性, 通过钻探能揭露到的孤石是十分有限的, 即使通过加密钻孔提高揭露孤石的机率, 但受成本、场地条件等限制, 是不现实的。

孤石具有明显区别于赋存环境周围岩土体(残积土、全风化或强风化岩)的物理性质, 为地球物理方法探测孤石提供了前提。以现有工程地球物理探测的技术水平来看, 对地铁盾构区间的孤石探测可分为洞内超前探测和地表浅层探查。由于盾构施工方法和装备所限, 在洞内实施超前探测很难具备可用的工作空间和有效的观测条件, 因此目前人们主要以地表探测手段为主对地铁盾构区间的孤石实施探测。目前, 用于孤石探查的方法主要有: 地质雷达法, 地震反射波法, 跨孔电阻率 CT 法等^[1-3]。除此之外, 徐佩芬等^[4]尝试采用微动视 S 波速度剖面法探测高速异常体(孤石), 取得初步探测效果。采用地面物探方法探测孤石, 不同方法的探测结果存在较大差异, 均达不到理想效果。对于有一定深度的目标体, 孔间/孔中物探方法具有相对较好的探测效果, 其分辨率远高于地面装置型式。跨孔电阻率 CT 方法可以采集丰富的数据量, 具有高分辨率精细探查的显著优势, 在孤石定位方面取得了一定的探测效果。

对于利用电阻率 CT 法探测地铁孤石而言, 分辨率、定位精度和可靠性是衡量其探测效果的关键指标。由于在电阻率 CT 探测孤石的多解性压制方法、有效观测方式及探测效果影响因素等方面缺乏系统深入的研究, 导致缺乏一套电阻率 CT 探测孤石的合理科学的探测方案和工作标准, 时常出现“探不到”(即难以识别小尺寸孤石)、“探不准”(即对孤石难以准确定位)

等问题, 使得孤石探测的可靠性难以保证, 无法满足工程实际需要。具体而言, 应用电阻率 CT 探测孤石存在以下几个关键性问题: ①同其他地球物理方法一样, 电阻率 CT 探测方法的反演与解译存在着多解性难题, 严重时会导致反演结果与实际情况差别较大, 对孤石难以准确定位, 因此亟需改善跨孔电阻率 CT 反演问题的多解性和反演效果; ②不合理的观测方式、不恰当的电极间距和钻孔间距将严重影响电阻率 CT 方法对孤石目标体的探测和识别能力, 导致孤石探测结果存在较大误差甚至探不到孤石的情况发生, 因此, 亟待提出一种提高孤石探测分辨率和定位精度的科学合理的观测方式; ③在工程实际勘察过程中, 既要考虑不同电极间距和孔间距内电阻率 CT 对孤石的勘探效果, 又要考虑用于钻探的较高成本, 亟需提出一种较为科学合理同时又较为经济的钻孔平面布置方案, 以提高电阻率 CT 反演成像方法探测孤石的效率。

针对上述问题, 本文首先提出了电阻率 CT 不等式约束反演成像方法和偏导数矩阵的并行解析快速求解方法, 从施加先验信息约束和提高反演精度两个方面共同改善了电阻率 CT 反演的多解性与成像效果。然后, 通过对比研究不同观测模式下的电阻率 CT 反演成像效果, 提出了一种更为有效的新型观测模式, 并在此基础上, 探讨孔中电极间距和钻孔间距两个参数对电阻率 CT 成像效果的影响, 进一步提出一种适宜于工程勘察的更有效的观测方案。最后, 通过物理模型试验研究, 验证了改进之后的电阻率 CT 方法的探测效果。

1 不等式约束反演成像方法

与地表电阻率探测相比, 电阻率 CT 采用跨孔“透视对穿”的观测方式, 可获取与孔间介质地电结构密切相关的大量有用数据, 因此该方法在分辨率和探测精度方面具有天然优势。正是基于这种优势, 跨孔电阻率 CT 被认为在精细探查领域具有良好的应用和发展前景。但是, 多解性问题是地球物理探测的固有难题, 电阻率 CT 探测也不例外。由于多解性问题的存在, 容易产生假异常, 同时对定位精度和分辨率造成影响。为保证电阻率 CT 法探测孤石的效果, 须在现有水平和基础上进一步提高电阻率 CT 探测的精度、分辨率和可靠性。

具体来说, 目前影响电阻率 CT 探测效果的理论问题主要有: ①多解性问题, 为减少反演的多解性, 须增加已知先验信息; ②反演中偏导数矩阵的计算常用的简化求解方法精度低, 解析求解方法精度高但耗时。针对上述两个主要问题, 本文首先提出了不等式约束

反演成像方法, 将表征电阻率变化范围的不等式约束作为先验信息引入到电阻率CT反演方程中; 其次, 本文提出了偏导数矩阵并行解析快速求解算法, 在保证求解效率的同时提高了求解精度。

1.1 含不等式先验约束的电阻率CT反演方程

本文电阻率CT反演是以全空间条件下的异常电位法有限元二维正演模拟为基础, 采取“反演核心区域等间距, 边界区域间距递增”的方式建立四节点矩形二维模型网格, 基于CHOLISKY分解法实现点源二维电场的求解。本文将表征电阻率变化范围的不等式约束引入到电阻率CT反演方程中, 其原理与二维电阻率约束反演成像方法^[5-6]类似。以下仅给出携带不等式约束的反演目标函数和反演方程:

$$\Phi = (\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m)^T (\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m) + \lambda (\mathbf{Cm})^T (\mathbf{Cm})$$

subject to $\rho_{\min_i} \leq m_i \leq \rho_{\max_i}$ 。 (1)

式(1)是携带光滑约束和不等式约束的反演目标函数, 其中, \mathbf{d}_{obs} 为实际观测数据, \mathbf{d}_m 为正演得到的理论观测数据, \mathbf{m} 为模型参数向量, \mathbf{C} 为光滑度矩阵, λ 为拉格朗日常数, 决定了光滑约束的权重, m_i 为第 i 个网格的电阻率, ρ_{\min_i} 和 ρ_{\max_i} 分别为第 i 个网格的电阻率的下限和上限。

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} + \mu_k \mathbf{X}^{-2} + \mu_k \mathbf{Y}^{-2}) \Delta \mathbf{m}$$

$$= \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{Cm} + \mu_k (\mathbf{X}^{-1} - \mathbf{Y}^{-1}) \mathbf{e} \quad (2)$$

式(2)是含有不等式约束的反演成像方程, 其中, \mathbf{A} 为偏导数矩阵, $\Delta \mathbf{m}$ 为模型参数增量向量, $\Delta \mathbf{d}$ 为观测数据, $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_m$, $\mathbf{e} = (1, 1, \dots, 1)^T$, \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 都是对角矩阵, \mathbf{X} 矩阵的对角线元素为 $m_i - \rho_{\min_i}$ ($i=1, 2, \dots, M$), \mathbf{Y} 矩阵的对角线元素为 $\rho_{\max_i} - m_i$ ($i=1, 2, \dots, M$)。

值得说明的是, 在电阻率CT方法实际探测孤石的过程中需要预先打好钻孔, 通过对钻孔取芯的分析可以得到介质的电阻率变化范围, 从而获得其不等式约束的上下限, 由此可见, 电阻率CT反演施加不等式先验约束具有天然的优势。

1.2 偏导数矩阵的并行解析快速求解方法

在电阻率法反演的流程中, 最为耗时的是偏导数矩阵的计算和反演方程的求解。目前常用的偏导数矩阵求解方法有Rodi法^[7]、积分法^[8]、电极互换定理法^[9]和解析法(即差分法)等。前3种方法采用简化计算的方式, 提高了偏导数矩阵的计算速度, 同时也不可避免的产生了舍去误差, 降低了求解精度。解析法是对偏导数矩阵进行直接求解的方法, 求解精度高, 但是计算工作量大、耗时长缺点成为制约其用于实际工程的瓶颈障碍。值得说明的是, 电阻率法正演的精度依赖于偏导数矩阵的计算精度, 因此, 本质上讲, 解

决解析法求解偏导数矩阵计算效率低的瓶颈问题可为更有效的改善反演成像效果提供前提。

针对上述问题, 考虑到解析法计算偏导数矩阵具有天然的并行计算特性, 本文提出了利用并行算法解决解析法计算效率瓶颈问题的思路。偏导数矩阵 A 的计算表达式如下

$$A_{ij} = \frac{\partial \rho_{si}}{\partial \rho_j} = \lim_{\Delta \rho_j \rightarrow 0} \frac{\Delta \rho_{si}}{\Delta \rho_j} \quad (3)$$

式中, A_{ij} 为偏导数矩阵 A 中第 i 行第 j 列个元素, ρ_{si} 为第 i 个视电阻率值, ρ_j 为第 j 个模型网格的电阻率值。解析法是利用定义将偏导数变差分进行直接求解的方法, 令 $\Delta \rho_j = \rho_j - 0.99\rho_j$, $\Delta \rho_{si} = \rho_{si1} - \rho_{si2}$, 其中 ρ_{si1} , ρ_{si2} 分别为模型网格电阻率值 ρ_j 改变前后的视电阻率值。

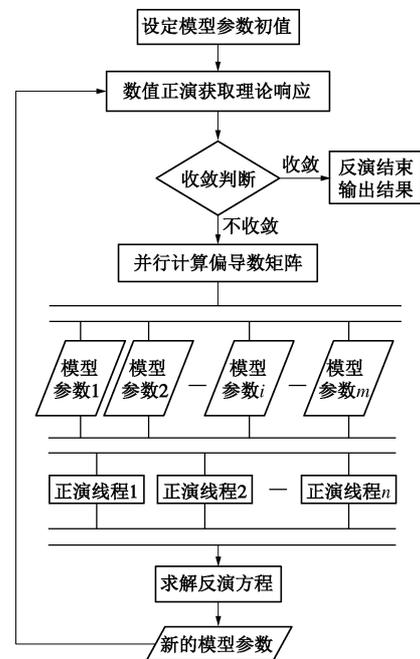


图1 偏导数矩阵并行解析快速求解流程

Fig. 1 Flow chart of parallel analytical fast solving method for partial derivative matrix

偏导数矩阵并行解析快速求解方法及其流程如图1所示, 本文将二维电阻率有限元模型作为参数化模型, 模型参数数目为 m , 在电阻率CT反演中每迭代一次均需要针对每个模型参数(即模型网格电阻率值 ρ_j)进行正演计算, 以求取对应模型的地球物理响应。由于不同模型参数的正演计算是彼此独立的, 因此利用主从并行模式^[10-13]进行偏导数矩阵的并行解析快速求解具有天然的合理性。主从并行模式指只在求解偏导数时采用并行计算, 而反演的其他部分依然采用串行计算, 主从并行模式简单易行, 是最常用的并行计算策略。主从式并行改造之后, 采用分块并行策略, 将计算任务平均分配给计算机线程。本文的并行算法

以多核CPU单机计算机为实现平台,应用基于共享内存的多处理器多线程并行系统,使程序自动分配线程进行并行化计算。

1.3 对比验证算例

为了评价电阻率CT不等式约束反演成像算法和偏导数矩阵的并行解析快速求解方法的效果,开展电阻率CT反演成像数值试验,与传统光滑约束和电极互换定理算法条件下的反演结果进行对比。在现场实际勘察中,常用的钻孔孔深为30 m,孔距为12 m,因此本文后续的普通算例模拟均采用与实际勘察等同的钻孔深度和孔距。建立如图2所示原始模型,在均匀半空间中存在电阻率为2000 $\Omega\cdot\text{m}$ 的两个孤石高阻体,赋存环境电阻率为300 $\Omega\cdot\text{m}$,两个高阻异常体的顶部埋深分别为5 m和15 m,底部距地面分别为10 m和18 m。采用跨孔电阻率CT装置测量,两钻孔位置分别设定在 $x=0$ m和 $x=12$ m处,孔深均为30 m,每个钻孔中布置30根电极,电极间距为1 m。

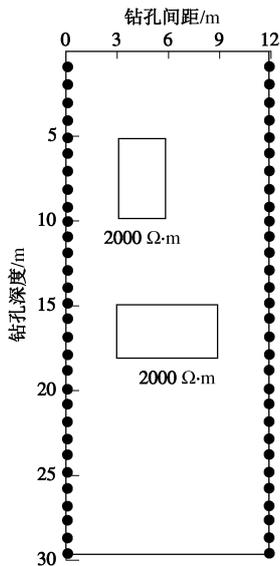


图2 两个异常体模型示意图

Fig. 2 Schematic map of model for two abnormal bodies

反演模型网格数量为864个,根据模型参数的设定将网格电阻率的取值限制在较为宽松的范围内,下限是1 $\Omega\cdot\text{m}$,上限是3000 $\Omega\cdot\text{m}$ 。图3(a)、图3(b)分别为施加简单光滑约束和施加不等式约束的反演结果,迭代次数均为9次,计算机配置为4核,8线程,主频1.66 GHz,内存2 GB。采用电极互换定理计算偏导数矩阵,总耗时约15 min;采用普通非并行式的解析求解方法,总耗时约为90 min;采用并行解析快速求解方法,总耗时约为13 min;可以看出,采用并行算法计算偏导数矩阵耗时将降低约85%。

从成像效果来看,图3(a)中两个孤石异常体垂直方向的位置与原模型较为一致,但水平方向的反演

效果较差,两个异常体的形态明显大于原模型,而且没有完全分离,分辨率较低,给地质解释带来了干扰和困难。图3(b)成像效果较好,对两个异常体边界的识别效果明显改善,两个孤石异常体在位置、规模、形态、电阻率值等方面均与原模型基本一致。

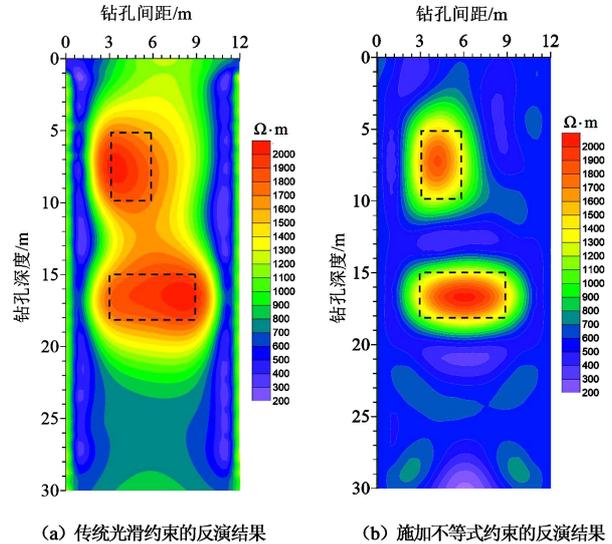


图3 施加不等式约束前后的反演结果比较

Fig. 3 Comparison of inversion results before and after inequality constrained

可见,施加不等式约束先验信息、利用偏导数矩阵的并行解析快速求解算法提高反演计算精度,使得反演多解性得到改善,对提高反演效果具有积极作用。本文的后续算例均为施加不等式约束后的反演成像结果。

2 跨孔电阻率 CT 孤石探测的有效观测模式

电阻率CT探测有多种观测模式,每种观测模式的分辨率及成像效果各有不同,其适用条件和探测对象也有所差别。地铁盾构区间孤石基本上以球状、近似球状或块状的形式赋存,或单个存在,或多个孤石成群分布。对于单个存在的孤石,探测和识别相对容易,而对于孤石群,由于各个孤石间的相对位置无规律可循,在CT成像中有可能相互干扰,相互重叠,给识别和定位造成困难。因此,很有必要通过典型观测方式对孤石成像效果的对比,优选或提出一种适应性强的有效观测模式。

2.1 跨孔电阻率 CT 常规的观测模式

根据孔中电极个数的不同,电阻率CT常规的观测模式可以分为3种类型:四极观测模式、三极观测模式和二极观测模式^[14-17](如图4所示,图中A、B代表供电电极,M、N代表测量电极)。其中,四极观测模式根据孔中电极阵列的差异,又可以分为a型(供

电-测量电极对分别位于不同的孔中)、b型(供电电极对和测量电极对分别位于不同的孔中)和c型(第一供电电极位于其中一个孔中,第二供电电极和测量电极对位于另一孔中)3种。

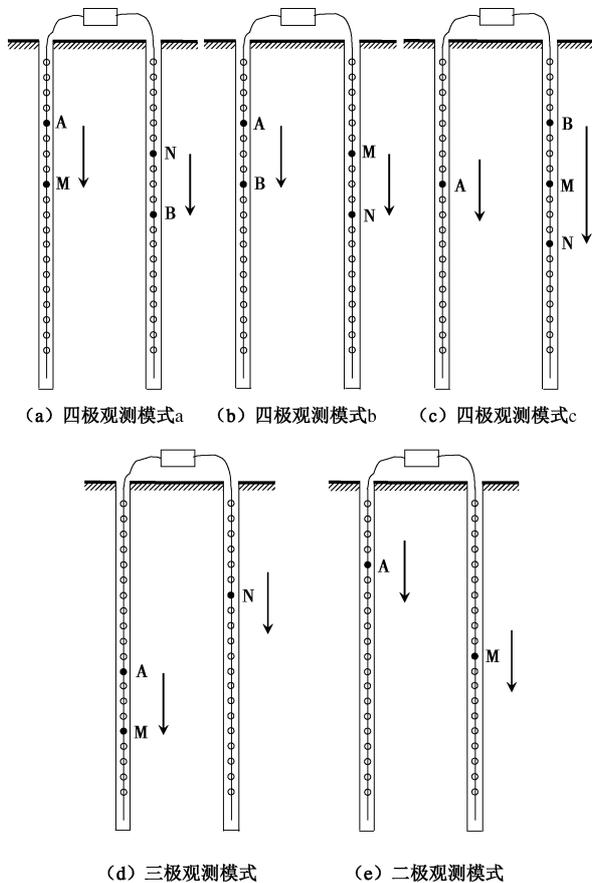


图4 跨孔电阻率CT常规观测模式

Fig. 4 Routine detection modes of cross-hole resistivity method

不同的跨孔电极阵列不仅采集的数据量不同,而且在空间中产生不同的电场分布,受探测目标体和干扰体的影响,每种观测模式对目标体的敏感程度也有很大的差别。因此,亟需通过模拟试验验证不同观测模式对孤石异常体的定位精度和成像分辨效果。由于篇幅所限,选取电阻率CT探测中最典型也最为常用的3种观测模式(四极观测模式a型、三极观测模式和二极观测模式)开展孤石探测的反演成像效果验证试验。

2.2 3种典型观测模式的反演成像效果

建立如图5(a)、图5(b)所示两个模型,分别代表单个孤石异常体模型和孤石群异常体模型。均匀半空间赋存环境电阻率均为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$,每个孤石高阻体的电阻率值均为 $2000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。考虑到地铁盾构隧道开挖掌子面埋深约在地面以下 $15\sim 25\ \text{m}$,该深度范围内的孤石群对盾构施工影响最大,是最为重要的探测区域,因此在两个模型中相应重点区域布置孤石异常体,

具体位置详见图5(a)、图5(b)。分别采用四极观测模式a型、三极观测模式和二极观测模式进行数值模拟,反演中所用的不等式约束范围为 $1\sim 3000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

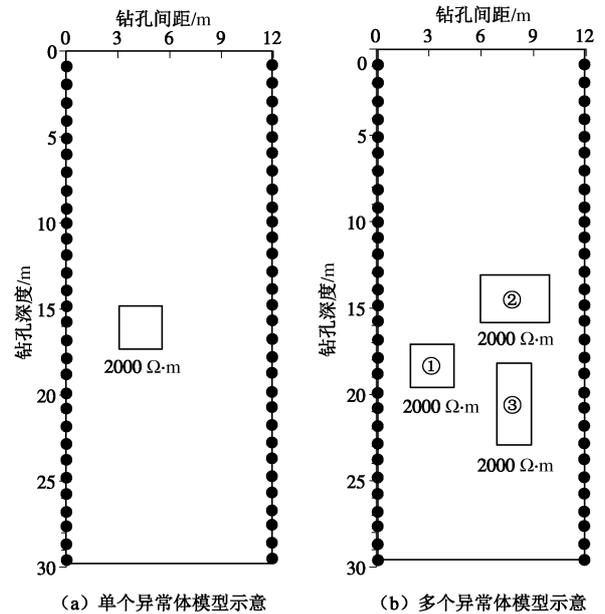


图5 异常体模型示意图

Fig. 5 Schematic map of model for different abnormal bodies

图6,7分别为对单个孤石异常体模型和孤石群异常体模型进行反演的结果,反演均迭代9次。

从单个孤石异常体的反演结果可以看出,3种观测模式均具有较好的垂向分辨效果,垂向定位精度较高;水平向分辨效果二极观测模式最好,四极a型观测模式最差;从形态规模上看,四极a型反演结果中的高阻异常体要远大于原模型中的孤石异常体;另外,四极a型和三极反演结果中孤石异常体上下均存在两处较大的低阻假异常,对地质解释将产生较大干扰。整体上来说,尽管3种观测模式的分辨效果各有差异,但基本上能够实现单个孤石高阻异常体的精确定位。

孤石群异常体的反演成像结果如图7所示,可以发现四极a型和三极观测模式已经无法分辨出原模型中的三处孤石异常,相比之下,二极观测模式的分辨效果和定位精度较高,但高阻异常体周围零散分布的低阻假异常明显增多,给地质解释带来困难。

2.3 电阻率CT探测孤石的有效观测模式

3种观测模式采集的数据量如表1所示。

每种观测模式除采集的数据量有所差别外,不同的孔间电场分布也会导致对异常体的敏感程度不同,因此每种观测模式具有各自的探测特点和优势。基于此种分析,本文提出了一种组合式的观测模式,即将四极a型、三极、二极观测模式采集到的数据提取出来,按顺序组装形成一个新的序列,再对该序列进行综合反演处理。

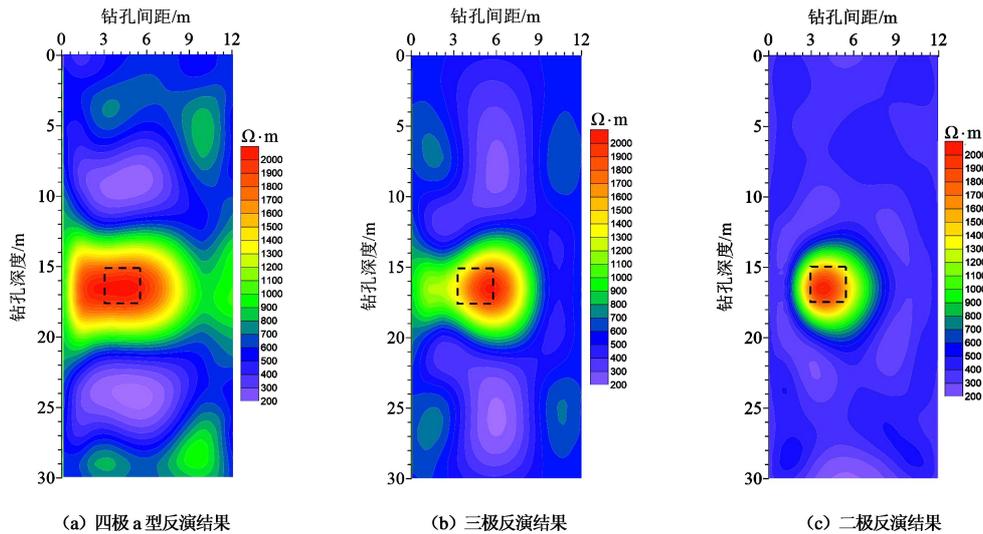


图6 单个孤石异常体的反演结果

Fig. 6 Inversion results of a single boulder anomaly

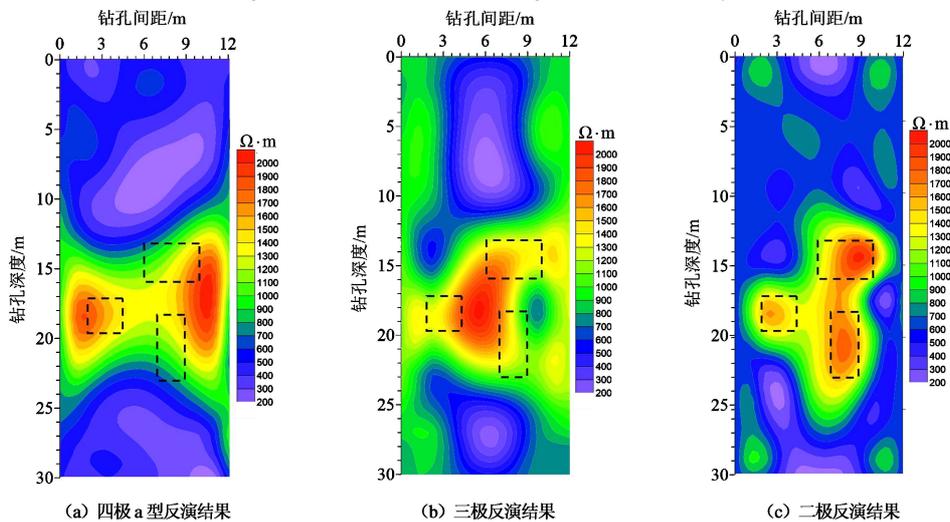


图7 孤石群异常体的反演结果

Fig. 7 Inversion results of boulder group anomalies

表1 不同观测模式采集数据量对比

Table 1 Comparison of data amount collected by different detection modes

观测模式	单孔中电极数量	采集数据量
四极a型	30	1352
三极	30	1560
二极	30	3540
组合式	30	6452

如表1所示, 组合式观测模式采集得到的数据量是3种常规观测模式采集到的数据量之和, 丰富的数据量在一定程度上可以有效地改善反演成像的效果, 抑制反演的多解性, 从而提高数据解译的精度; 不仅如此, 组合式观测模式综合了3种常规观测模式的探测优势, 提高了对异常体的识别能力, 具有更好的反演成像效果。

图8为组合式观测模式的反演成像结果, 反演迭代9次, 可以看出成像效果大大提高, 与成像效果较好的二极观测模式相比, 不仅假异常大大减少, 对孤石群

异常体的边界识别效果明显改善, 无论是单个孤石异常体还是孤石群异常体, 在位置、规模、形态、电阻率值等方面均与原模型基本一致。

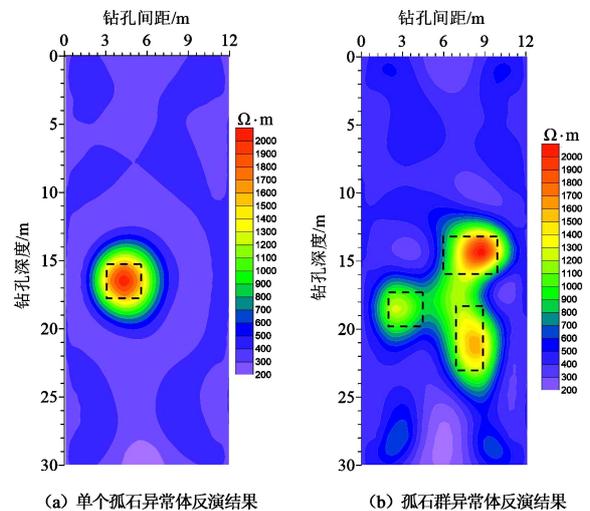


图8 组合式观测模式的反演结果

Fig. 8 Inversion results by combined detection mode

除此之外,笔者还针对其他模型,如改变孤石(群)异常体的赋存深度、变换孤石(群)异常体和钻孔的相对位置等进行了大量的数值算例反演成像研究,研究表明,与常规的观测模式比较,组合式观测模式在孤石群探测的分辨率、定位精度和可靠性上具有显著的优势。

为了统一和便于对比,如无特殊说明,本文后续算例所采用的组合式观测模式均为四极a型、三极和二极观测模式3种模式的组合。

3 孤石探测成像效果影响要素分析及探测方案

孔间距、孔中电极间距是跨孔电阻率CT方法在探测过程中需要设定的两个重要参数,如果孔距和电极间距设定不合理,即便采用组合式观测模式,也难以取得理想的探测成像效果。

3.1 不同孔距的探测成像效果

建立如图9所示模型,在均匀半空间中存在电阻率为2000 Ω·m的两个孤石高阻体,赋存环境电阻率为300 Ω·m。模型中两个孤石体始终位于两钻孔之间,尺寸均为2 m×2 m,顶部埋深分别为13和20 m。选取孔距分别为8, 12, 20和30 m的4种情形进行模拟,根据控制单一变量的原则,电极间距均为1 m,每个钻孔中布置30根电极。采用组合式观测模式进行数值模拟,反演中所用的不等式约束范围为1~3000 Ω·m。

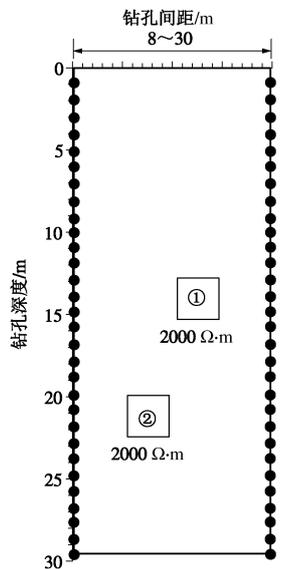
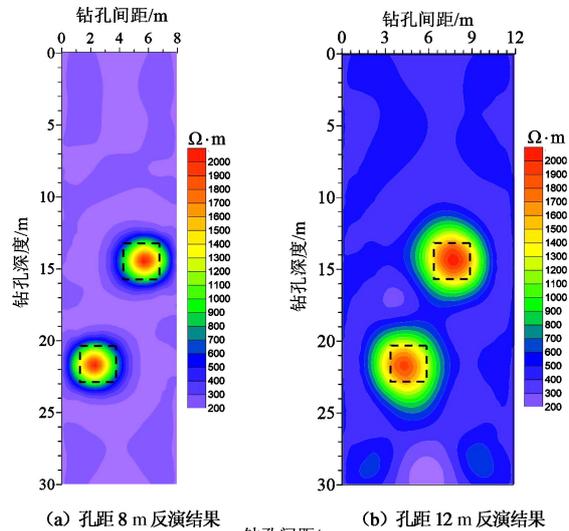


图9 两个异常体模型示意图

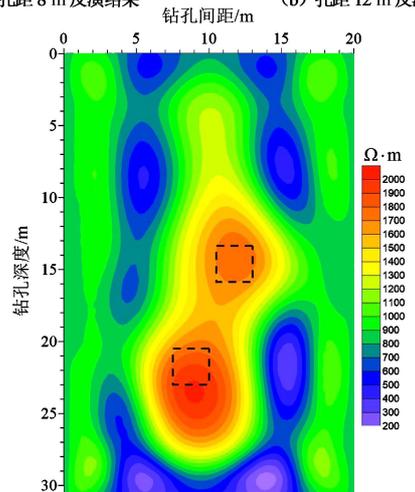
Fig. 9 Schematic map of model for two abnormal bodies

图10 (a)、图10 (b)、图10 (c) 和图10 (d) 分别为孔距8, 12, 20和30 m的反演成像结果。从图中可以看出,孔距8 m时成像效果较理想,两个高阻异常体与原模型中的孤石体在位置、规模、形态等方面几乎完全一致,且基本没有假异常;孔距12 m时成像效果较好,除规模较原模型略微偏大外,位置、形态

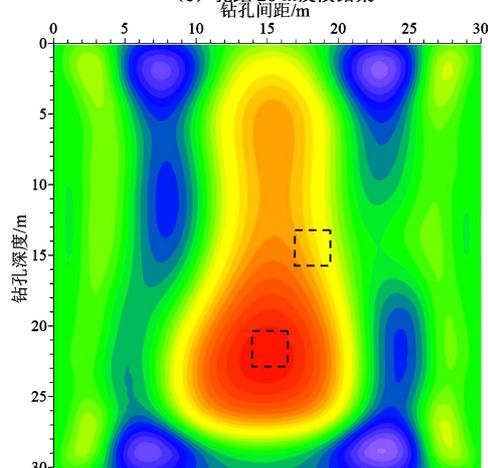
等与原模型较为一致,假异常很少;孔距达到20 m时,成像效果和定位精度明显下降,两个高阻异常体不仅规模比原模型偏大,在定位上也有较大偏差,同时周围低阻假异常也明显增多;孔距达到30 m时,已无法对两处孤石目标体进行成像识别,这样的探测结果不能指导地质解释做出正确的判断。



(a) 孔距 8 m 反演结果 (b) 孔距 12 m 反演结果



(c) 孔距 20 m 反演结果



(d) 孔距 30 m 反演结果

图10 不同孔距的反演成像结果对比

Fig. 10 Comparison of inversion imaging results with different borehole distances

整体上来看, 在电极间距不变的情况下, 电阻率CT的反演成像效果随两钻孔间距的增大而越来越差, 只有当两孔间距小于或等于20 m左右时, 跨孔电阻率CT的反演成像结果才能为地质解释提供较为可靠的参考。分析其中原因, 主要有两点: ①孔距增大, 孔间电场随之减弱, 对孤石探测的信噪比将逐渐降低, 对分辨率和定位精度产生了较大的影响; ②随着孔距的增大, 参与反演的网格数量越来越多, 反演的多解性问题也越来越突出, 影响了反演成像效果。

除此以外, 笔者还针对不同数量、不同规模、不同位置的孤石(群)异常体开展了大量的数值算例反演成像研究, 研究结果表明, 为了保证电阻率CT探测孤石的分辨率和定位精度, 不能无限增大孔距, 孔距必须控制在一定范围以内。采用组合式观测模式进行数据采集, 孔距控制在20 m范围以内的探测结果才是可靠的。

3.2 不同电极间距的探测成像效果

仍以图9所示模型为例, 模型中两处高阻异常体的大小和埋深保持不变, 分别选取电极间距3, 6 m两种情形进行模拟, 根据控制单一变量原则, 孔距12 m、孔深30 m保持不变。采用组合式观测模式进行数值模拟, 反演中所用的不等式约束范围为1~3000 Ω·m。

图10(b)、图11(a)和图11(b)分别为电极间距1, 3和6 m的反演结果。可以看出, 电阻率CT方法对孤石异常体的识别能力和定位精度是随着电极间距的增大而降低的。与电极间距1 m的成像效果相比, 电极间距3 m时两个高阻异常体的成像规模明显扩大, 表明分辨能力有所下降; 电极间距达到6 m时, 已无法对两处孤石目标体的形态进行准确识别, 成像结果不能指导地质解释做出正确判断。

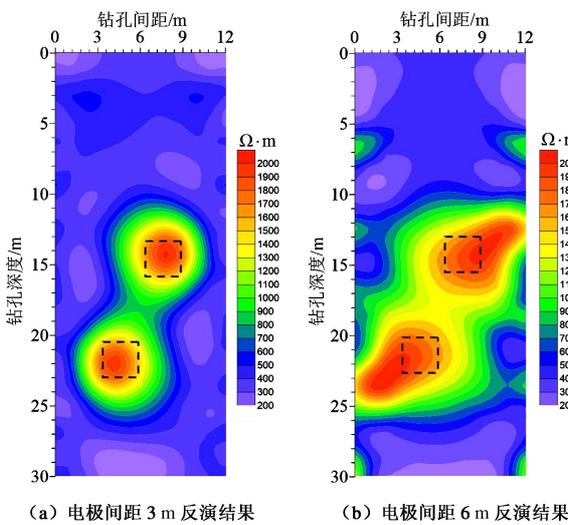


图11 不同电极间距的反演成像结果对比

Fig. 11 Comparison of inversion imaging results with different electrode spacings

整体上来看, 随着电极间距的增大, 单位探查区

域采集到的关于孤石异常体的有效数据量将随之减少, 因而会对探测的分辨率产生较大影响。因此, 在孔距不变的情况下, 只有当电极间距小于或等于3 m时才能确保电阻率CT对孤石较为准确的探测识别, 其反演成像结果才能为地质解释提供较为可靠的参考。

3.3 孤石粒径识别效果分析

建立如图12所示两个模型, 分别选取1 m×1 m和0.5 m×0.5 m两种小尺寸孤石异常体进行模拟。赋存环境电阻率为300 Ω·m, 异常体电阻率均为2000 Ω·m, 顶部埋深均为15 m。孔深30 m, 孔距12 m, 每孔30个电极, 电极间距1 m。采用组合式观测模式进行数值模拟, 反演中所用的不等式约束范围为1~3000 Ω·m。

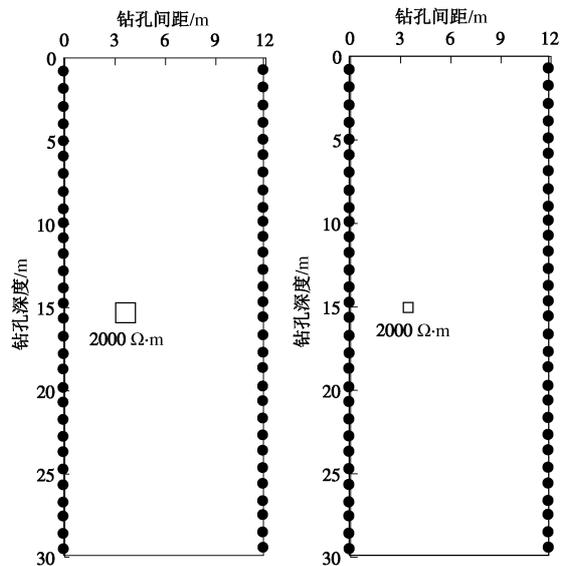
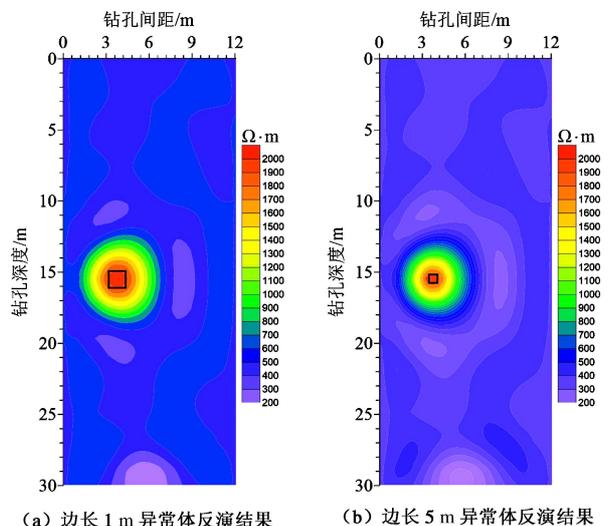


图12 小粒径孤石异常体模型示意

Fig. 12 Schematic map of model for small-size boulders anomalies

反演成像结果如图13所示, 可以看出, 现有方案可以探测并识别出最小粒径为0.5 m左右的孤石异常体, 且定位精度较高, 但对小粒径孤石异常体的成像规模偏大, 会对地质解释造成一定的干扰。



(a) 边长1 m异常体反演结果 (b) 边长0.5 m异常体反演结果

图13 小粒径孤石异常体反演成像结果

Fig. 13 Inversion imaging results of small-size boulders anomalies

3.4 孤石探测有效钻孔平面布置方案探讨

在工程实际勘察过程中，既要考虑钻孔间距和电极间距对跨孔电阻率CT装置探测孤石效果的影响，同时也要考虑用于钻探的较高成本。基于此种考虑，本文提出了地面物探普查（如图14）与跨孔电阻率CT详查（如图15）相结合探测地铁盾构区间孤石的思路。具体方案如下：①首先利用地面物探手段（如地震反射波法、高密度电法等）对地铁隧道盾构掘进前方未开挖段地质情况进行普查，圈定疑似单个大直径孤石、“孤石群地层”或存在安全隐患的重点探查区域；②以布置深度为30 m的钻孔（每个钻孔中安放30根电极，电极间距为1 m）能够满足盾构掘进区域沿线隧道洞身范围内孤石群的基本勘探要求为例，根据本文上面的计算和讨论，当相邻钻孔间距小于或等于20 m时，电阻率CT探测的反演成像结果才是科学有效的，基于该前提，在圈定的重点探查区域灵活布置跨孔电阻率CT钻孔和测线进行详查，如图15所示。

在图15中，实心圆点代表钻孔孔位，实线代表跨孔电阻率CT探测二维剖面，线性标注表示相邻钻孔之间的最大探测距离不超过20 m。

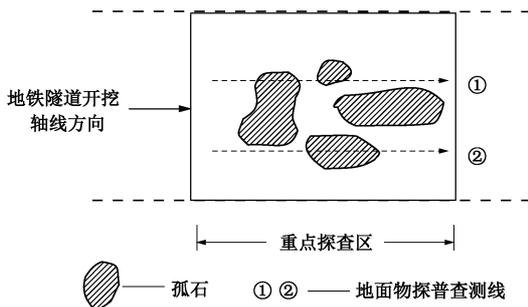


图14 地面物探方法普查示意图

Fig. 14 Schematic map of screening with ground geological method

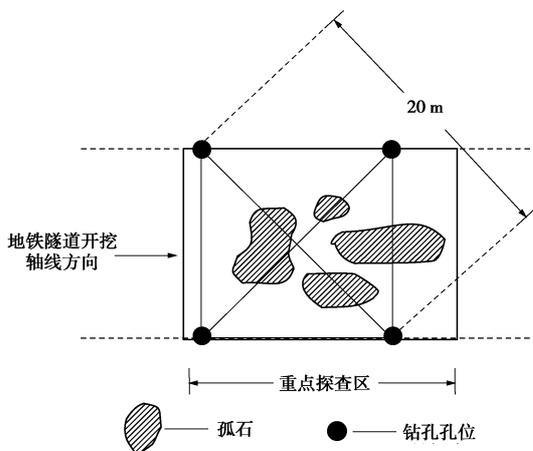


图15 孤石探测钻孔平面布置方案

Fig. 15 Layout scheme for metro boulder detection

在工程实际中，采用地面物探普查与电阻率 CT 详查相结合的探测思路，可以大大提高孤石探测的效率。

4 物理模型试验

笔者所在课题组开展了跨孔电阻率CT探测孤石的物理模型试验研究，试验模型示意如图16所示，基于相似性原理^[18]，需要满足以下两个方面的要求：①几何因素比值统一为G，几何因素包括地质体的大小、埋深、位置、电极位置等；②各电性不均匀体的比值参数须与实际地质条件一致。

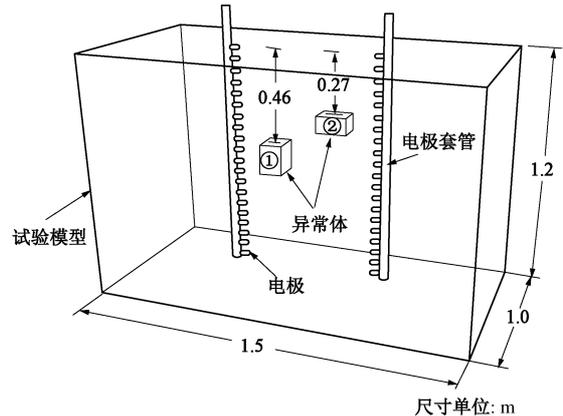


图16 试验模型示意图

Fig. 16 Schematic map of physical model

本模型选择的几何因素比值G为30（即原型几何尺寸与模型几何尺寸之比），表2为各几何因素原型尺寸与模型尺寸的对照。

表2 各几何因素原型尺寸与模型尺寸对照表

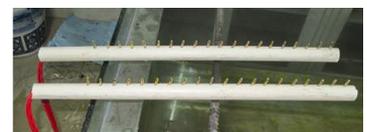
Table 2 Comparison of different geometric factors in prototype and model dimensions

几何因素	原型尺寸 /(m×m×m)	模型尺寸 /(m×m×m)
模型长度×宽度×高度	45×30×36	1.5×1.0×1.2
异常体①长度×宽度×高度	1.5×1.5×2.1	0.05×0.05×0.07
异常体①顶部埋深	13.8	0.46
异常体②长度×宽度×高度	2.1×1.2×1.2	0.07×0.04×0.04
异常体②顶部埋深	8.1	0.27
电极套管深度×套管间距	30×18	1.0×0.6
电极间距	1.5	0.05

模型中充填导电性能良好的黏土材料来模拟孤石的赋存环境，通过调节黏土的含水率和压实度等控制其电阻率值保持在300 Ω·m左右；试验中用两个混凝土块模拟孤石高阻体，通过调节配比控制其电阻率值均在2300 Ω·m左右，保证混凝土块与黏土电阻率的比值与工程实际中孤石高阻体与赋存环境电阻率的比值一致。



(a) 电极



(b) 电极套管

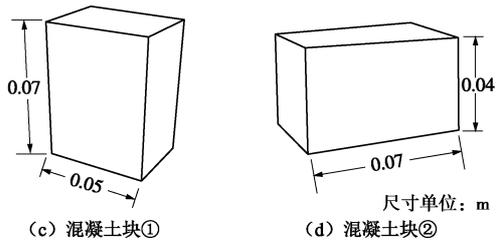


图 17 物理模型试验用到的材料

Fig. 17 Materials used in physical model tests

试验中利用 PVC 套管和小铜棒分别模拟钻孔套管和电极, 所用材料如图 17 所示, 每根套管上装有 20 根电极, 所有电极均埋设在土层表面以下。搭建完成的试验模型如图 18 所示, 每根电极均用铜芯导线引出并做好编号, 外端连接到探测电缆上。本次试验采用美国 AGI 公司生产的 SuperSting R8/IP 高密度电法仪进行数据的采集工作, 探测结果经反演成像处理后如图 19 所示, 反演中所用的不等式约束范围为 $1 \sim 3000 \Omega \cdot m$ 。

从图 19 中可以看出, 四极 a 型和三极观测模式对异常体的成像效果较差, 难以准确反映两处异常体的形态; 二极观测模式受两处异常体相互干扰的影响较为严重, 只能较好地反映深处的异常体的位置和形态; 组合式观测模式对两处异常体的探测识别和成像效果最好, 基本能够准确地反映两处异常体的大小和形态, 定位精度高。



图 18 试验模型实物图

Fig. 18 Real map of physical model

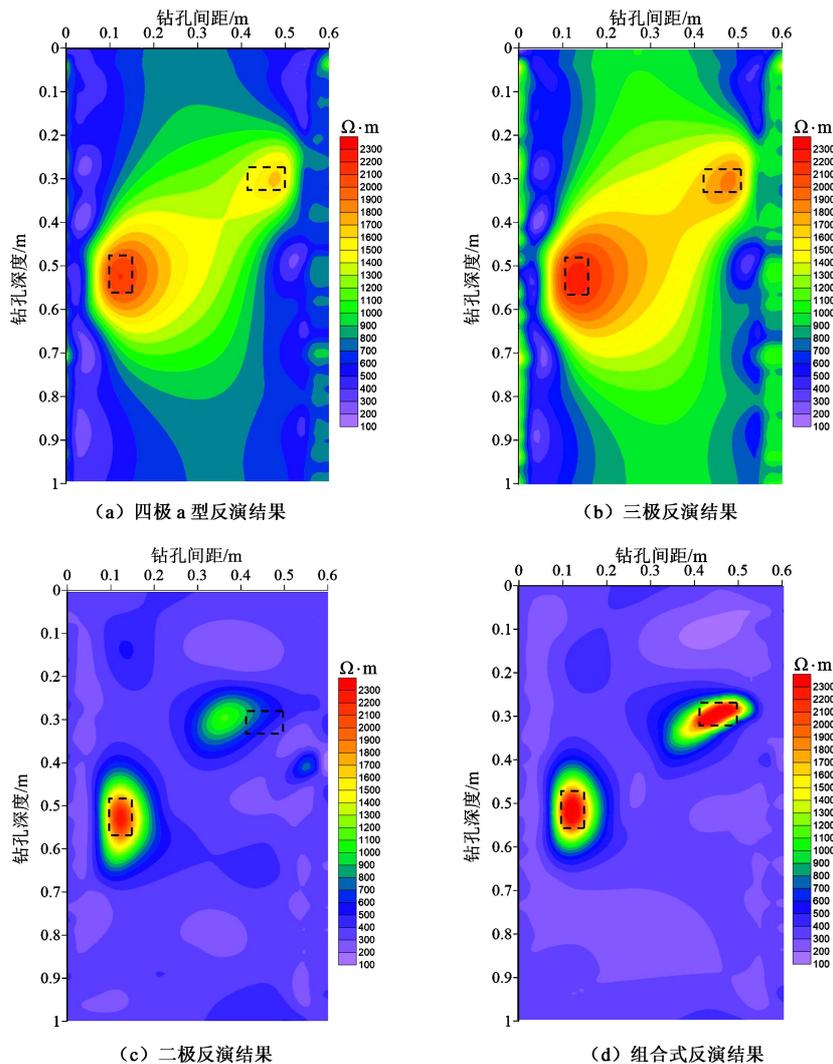


图 19 物理模型试验反演成像结果

Fig. 19 Inversion imaging results of the physical model experiment

5 讨 论

目前,跨孔电阻率CT法探测地铁盾构区间孤石群尚局限在二维探测领域,可以清楚地对位于探测剖面内的孤石异常体进行成像(如图20(a)所示),但难以揭露位于探测剖面外的孤石异常体(如图20(b)所示);不仅如此,由于地下点电源产生的电场是三维的,二维电阻率CT的探测结果还会受到来自探测剖面外的孤石异常体的干扰,如图20(b)所示,即电阻率CT探测剖面①、②、③和④的探测结果都会受到图中孤石异常体的干扰而导致成像结果产生偏差,这就对跨孔电阻率CT钻孔孔位的布置提出了很高的要求。因此,在现有情况下需要在地面物探普查的基础上合理选择钻孔孔位,以提高孤石探测的效率。今后,笔者所在课题组将进一步研究跨孔三维电阻率CT的探测方法,尽可能准确地探查清楚盾构掘进区域地铁隧洞洞身范围内的孤石群。

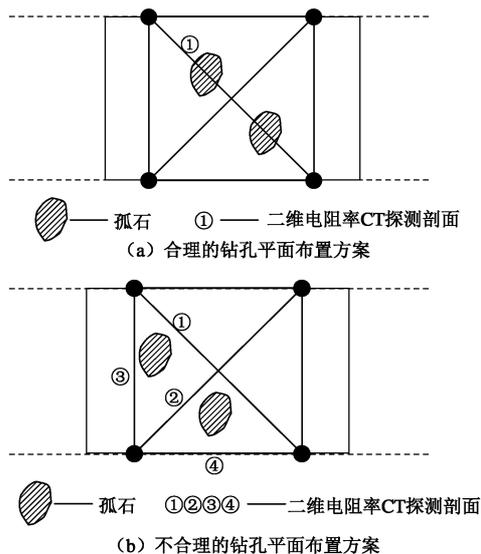


图20 不同钻孔平面布置方案的影响示意图

Fig. 20 Schematic map of influences from different borehole layout schemes

6 结 论

(1) 提出了电阻率CT不等式约束反演成像方法和偏导数矩阵的并行解析快速求解方法,从施加先验信息约束和提高反演精度两个方面共同改善了电阻率CT反演的多解性与成像效果,为电阻率CT方法探测地铁孤石提供了高效稳定的反演算法。

(2) 提出了一种组合式观测模式,将常规观测模式采集到的数据提取出来组装成一个新的序列,再对该序列进行综合反演处理。组合式观测模式不仅采集

到更多有效的数据量,而且集成了多种常规观测模式的探测优势,可以获得更好的反演成像结果。

(3) 针对影响孤石探测效果的两大要素——孔距和电极间距进行了数值模拟试验研究,得出了在组合式观测模式下的有效孔距范围(小于或等于20 m)和合理的电极间距参数(小于或等于3 m),试验表明现有方案可以探测并识别出粒径为0.5 m左右的孤石异常体。在此基础上,提出了地面物探普查与跨孔电阻率CT详查相结合的孤石探测方案。

(4) 开展了跨孔电阻率CT孤石探测物理模型试验研究,对有效的孔距和电极间距参数、组合式观测模式以及优化后的反演方法进行了验证,试验结果比较准确地反映了异常体的位置和形态。本文的研究对于提高电阻率CT方法孤石探测的分辨率、改善反演效果、挖掘数据价值方面具有较为重要的意义,下一步的研究的重点是加强相关的工程实践以及三维跨孔电阻率CT探测方法的研究。

参考文献:

- [1] 王俊茹, 吕继东. 地下障碍物雷达定位探测的技术应用[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 84 - 86. (WANG Jun-ru, LÜ Ji-dong. Technical application of applying ground penetrating radar to the detection of obstruction[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(3): 84 - 86. (in Chinese))
- [2] 刘宏岳. 地震反射波 CDP 叠加技术在海域花岗岩孤石探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(6): 714 - 718. (LIU Hong-yue. Marine seismic reflection for the detection of the weathering residues in the granite[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(6): 714 - 718. (in Chinese))
- [3] 李红立, 张 华, 汪传斌. 跨孔超高密度电阻率法在花岗岩球状风化体勘探中的试验研究[J]. 工程勘察, 2010(8): 88 - 92. (LI Hong-li, ZHANG Hua, WANG Chuan-bin. Experimental study on the cross-hole ultra-density resistivity method used in the exploration for the spheric lightly-weathered granite[J]. Geological Investigating & Surveying, 2010(8): 88 - 92. (in Chinese))
- [4] 徐佩芬, 侍 文, 凌苏群, 等. 二维微动剖面探测“孤石”以深圳地铁 7 号线为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2120 - 2128. (XU Pei-fen, SHI Wen, LING Su-qun, et al. Mapping spherically weathered “boulders” using 2D microtremor profiling method: a case study along subway line 7 in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2120 - 2128. (in Chinese))
- [5] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 等. 基于不等式约束的最小二乘

- 法三维电阻率反演及其算法优化[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(1): 260 - 268. (LIU Bin, LI Shu-cai, LI SHU-chen, et al. 3D electrical resistivity inversion with least-squares method based on inequality constraint and its computation efficiency optimization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, **55**(1): 260 - 268. (in Chinese))
- [6] 刘 斌, 李术才, 聂利超, 等. 矿井突水灾变过程电阻率约束反演成像实时监测模拟研究[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(10): 1722 - 1731. (LIU Bin, LI Shu-cai, NIE Li-chao, et al. Real-time monitoring of mine water inrush catastrophic process using electrical resistivity constrained inversion imaging method[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(10): 1722 - 1731. (in Chinese))
- [7] RODI W L A. Technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1976, **44**(2): 483 - 506.
- [8] 底青云, 王妙月. 积分法三维电阻率成像[J]. 地球物理学报, 2001, **44**(6): 843 - 852. (DI Qing-yun, WANG Miao-yue. 3-D resistivity tomography by integral method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, **44**(6): 843 - 852. (in Chinese))
- [9] 阮百尧. 视电阻率对模型电阻率的偏导数矩阵计算方法[J]. 地质与勘探, 2001, **37**(6): 39 - 41. (RUAN Bai-yao. The calculation method of partial derivative matrix of apparent resistivity on model resistivity[J]. Geology and Prospecting, 2001, **37**(6): 39 - 41. (in Chinese))
- [10] HUANG Kuo-chan, WANG Feng-jian, TSAI Jyun-hwei. Two design patterns for data-parallel computation based on master-slave model[J]. Information Processing Letters, 1999, **70**(4): 197 - 204.
- [11] CHEN Li, QIU Jian-lin, CHEN Jian-ping, et al. Improved master-slave parallel task-allocating algorithm and its implementation[C]// Proceeding-2011 International Conference on Network Computing and Information Security. Guilin, 2011: 209 - 212.
- [12] 刘耀儒, 杨 强, 刘福深, 等. 基于并行改进遗传算法的拱坝位移反分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(9): 1542 - 1550. (LIU Yao-ru, YANG Qiang, LIU Fu-shen, et al. Inverse analyses of arch dam displacements using improved parallel genetic algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2006, **46**(9): 1542 - 1550. (in Chinese))
- [13] 张志增, 李仲奎, 程丽娟. 基于主从式并行遗传算法的岩土力学参数反分析方法[J]. 工程力学, 2010, **27**(10): 21 - 26. (ZHANG Zhi-zeng, LI Zhong-kui, CHENG Li-juan. Back analysis on geomechanical parameters based on a master-slave parallel genetic algorithm[J]. Engineering Mechanics, 2010, **27**(10): 21 - 26. (in Chinese))
- [14] ZHOU Bing, REENHALGHAS A G. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations[J]. Geophysical Prospecting, 2000, **48**(5): 887 - 912.
- [15] GOES B J M, MEEK J A C. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2004, **9**(3): 127 - 141.
- [16] DANIELSEN B E, DAHLIN T. Numerical modeling of resolution and sensitivity of ERT in horizontal boreholes[J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, **70**(3): 245 - 254.
- [17] KONSTANTINOS L, APOSTOLOPOULOS George V. Laboratory study of the cross-hole resistivity tomography: the model stacking (MOST) technique[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, **80** (1): 67 - 82.
- [18] 魏建新, 牟永光, 狄帮让. 三维地震物理模型的研究[J]. 石油地球物理勘探, 2002, **37**(6): 556 - 561, 660. (WEI Jian-xin, MOU Yong-guang, DI Bang-rang. Study on the 3D seismic physical model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, **37**(6): 556 - 561, 660. (in Chinese))