doi: 10.11720/wtyht.2026.1108
梁超, 邓稀肥, 申志军, 等. 基于直流电阻率法的基坑地下水探测正演模拟[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 111-118. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1108
Liang C, Deng X F, Shen Z J, et al. Forward modeling of groundwater detection in foundation pits based on the direct current resistivity method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 111-118. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1108

基于直流电阻率法的基坑地下水探测正演模拟

梁超[1,2,3], 邓稀肥[1,2,3], 申志军[1,2,3], 李宏波[1,2,3], 汪涛[1,2,3]
(1. 中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥 230026; 2. 中铁四局集团工程技术研究院, 安徽 合肥 230026; 3. 中国中铁城市轨道交通专业研发中心, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 随着基坑工程中对地下水探测精度要求的不断提高, 直流电阻率法在该领域的应用潜力受到广泛关注。本研究通过数值模拟方法探究了直流电阻率法在基坑地下水探测中的应用潜力, 构建了双层结构模型, 分析了地下水深度对电极响应的影响及电极数量与探测范围的关系。结果显示, 电极探测得到的电压极值与地下水深度之间存在显著的指数关系, 表明直流电阻率法在探测地下水深度方面具有应用潜力。然而, 随着地下水埋深的增加, 信号衰减和噪声干扰加剧, 限制了直流电阻率法的探测深度。此外, 研究发现单纯增加电极数量并不能有效扩大探测范围, 而需要通过改变电场分布来增强直流电阻率法的探测能力。本研究为直流电阻率法在地下水探测中的应用提供了理论依据, 并指出了其在实际应用中需要克服的挑战。

关键词: 直流电阻率法; 基坑; 数值模拟; 地下水探测
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0111-08

0 引言

在进行基坑挖掘作业时, 地下水的存在往往是决定基坑稳定性的关键因素。为了预防基坑突涌、底板上升、渗透破坏和管涌等地质风险, 基坑探测技术被广泛采用[1]。目前, 探测地下水的技术有多种, 包括电磁法、地质雷达、地震波、高密度电阻率法、直流电阻率法等[2-5], 其中直流电阻率法以其快速无损的优势, 在地下水探测领域显示出巨大的潜力[6]。

针对直流电阻率法在超前探测中的应用, 学者们展开了系统性的研究。黄俊革等[7] 通过全空间板状体模型分析发现, 在电极极距较小时, 坑道空腔主要影响电阻率的幅值, 但对迎头前方地质体的异常响应干扰较小, 明确了电极布置的基础参数范围; 马炳镇等[8] 进一步指出, 巷道几何尺寸、供电电极布置及围岩导电性是影响电流场分布的关键因素, 为探测系统的空间布局提供了理论依据。针对巷道空腔带来的测量干扰, 鲁晶津等[9] 采用代数多重网格算法优化二次场求解, 提出通过比值曲线来消除空腔影响, 并利用定点源多面测量技术识别旁侧异常, 提升了在复杂环境下的探测精度; 刘斌等[10] 则针对理论滞后于实践的问题, 构建了包含干扰识别与去除的全流程技术体系, 实现了掌子面前方有效信息的精准提取。

尽管直流电阻率法具备快速无损的技术优势, 但复杂地质条件下的电阻率信号耦合效应、多场源干扰机制仍对探测精度构成制约, 其理论模型与工程实际应用之间的适配性问题亟待深化研究。随着计算机技术的发展, 数值模拟技术为基坑探测模拟提供了有力的手段, 众多研究者通过数值模拟, 深化了对基坑降水和地下水位变化的理解。例如, Zhou 等[11] 基于上海软土的现场抽水试验, 采用三维有限差分法模拟基坑降水, 发现地下连续墙能有效控制地面沉降。Li 等[12] 通过统计分析上海市区的抽水试验, 揭示了地面沉降与水位下降的非比例关系。周志芳等[13] 提出了双层结构数学模型, 利用有限元

收稿日期: 2025-04-02; **修回日期**: 2025-08-25
基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2023-重大专项-10)
第一作者: 梁超(1972-), 男, 正高级工程师, 主要从事工程地球物理勘探方面的研究工作。Email: liangchao_0824@126.com
通讯作者: 邓稀肥(1987-), 男, 正高级工程师, 主要从事工程地球物理勘探方面的研究工作。Email: dengxifei_1010@126.com

计算为基坑设计提供新思路。赵宇豪等[14]使用ABAQUS软件模拟基坑降水，分析止水帷幕深度对环境的影响。Zheng等[15]针对兰州一号线附近的风井基坑，采用防渗墙处理强透水性地层，展现了良好的防渗效果。

本研究运用数值模拟方法，探讨了直流电阻率法在地下水探测领域的应用潜力。研究重点放在了直流电阻率法在基坑地下水探测中的正演模拟方面。通过数值模拟，系统分析了不同深度地下水对电极的响应，以及电极数量与探测范围之间的相关性，揭示了电极参数与地下水探测效果之间的内在联系，为优化ERT技术在地下水探测中的应用提供了理论依据和实践指导。

1　基坑模型及土层电导率确定

1.1　双层结构含水模型

我国长江中下游沿江城市大多位于长江一级阶地上，地基呈典型的双层结构[16]，上部由透水性弱、力学强度低的黏性土层组成，下部由强度相对高、透水性强的砂、砾、卵石层构成，许多基坑的降水设计都基于双层结构[13,17]。本文基于双层结构探究层析成像设备中电极探测的电场数据与地下水深度之间的关系，用于指导工程施工。

本文构建的双层结构如图1所示，上层由透水性较弱的土层构成，并在该土层上开挖基坑，基坑的深度为15 m，侧壁坡度为1∶0.5，在基坑底部布置电极用于探测地下水距离基坑底部的距离。下层由含水量较大的含水层构成，含水层的深度设置为25 m，用于模拟地下水。在整个研究过程中弱透水层的深度会进行调整，以改变基坑底部与含水层之间的距离，来模拟不同深度的地下水。

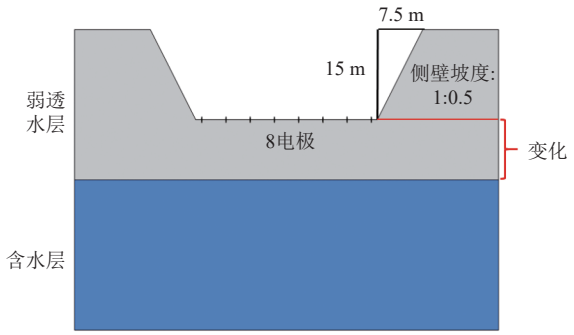


图1　双层结构

Fig. 1　Two-layer structure

1.2　地层电导率

电导率是影响土体中电场变化的重要参数，根据研究，电导率的大致取值范围为0.02~0.2 S/m[18-19]，且与含水率呈正相关。可以近似认为电导率随含水率呈线性增长，电导率随含水率的显示表达式为：

$$\sigma_e(\theta) = a \cdot \theta + b, \qquad (1)$$

式中：a、b为土质参数系数；θ为含水率。根据地层分布和地层特性[20]，本文中弱透水层与含水层的电导率参数取值见表1。

表1　双层结构的电导率

Table 1　Conductivity of double layer structure

土层	a	b	含水率/%	电导率/(S·m^{-1})
弱透水层	0.0025	0.02	10	0.02025
含水层	0.01	0.06	60	0.066

2　有限元数值仿真模拟

2.1　基坑地下水探测正演模拟流程

本研究利用Comsol多物理场仿真软件对基坑地下水探测进行了正演模拟研究。Comsol软件以其卓越的计算效率和多物理场耦合能力，在多个领域内得到了广泛应用，包括但不限于AC/DC、射频、声学等领域。其中，Comsol提供的稳态电流传导分析模块，为层析成像的有限元仿真提供了坚实的技术支持。此外，软件内置的参数化设计编程语言API，通过循环编程的方式，能够高效地处理基坑地下水电场的仿真工作，快速生成大量数据，为后续的反演成像研究奠定了坚实的数据基础。因此，本研究选择Comsol软件来进行地下水探测的二维正演模拟。

模拟过程主要分3个关键步骤。①模型构建与参数设定阶段：进行模型向导的选择、物理场的确定、单元类型的配置、几何实体模型的构建、材料属性的定义以及网格的剖分工作；②分析类型选择与求解阶段：根据模拟需求选择适宜的分析类型，施加必要的载荷和边界条件，并启动了求解过程；③结果处理与分析阶段：求解完成后，对模拟结果进行了必要的后处理，包括绘制云图和生成报告等，以便于结果的分析和解释。地下水有限元仿真的具体流程详见图2，该图详细展示了从模型构建到获取电压数据的整个流程。

2.2　地电几何实体模型的建立

在本研究中，首先通过模型向导选择了“二维”选项，以适应模拟的需求。其次在物理场设置中选择“电流”作为主要的物理场进行模拟。我们根据实验模型的具体尺寸和参数，在Comsol软件中构建了

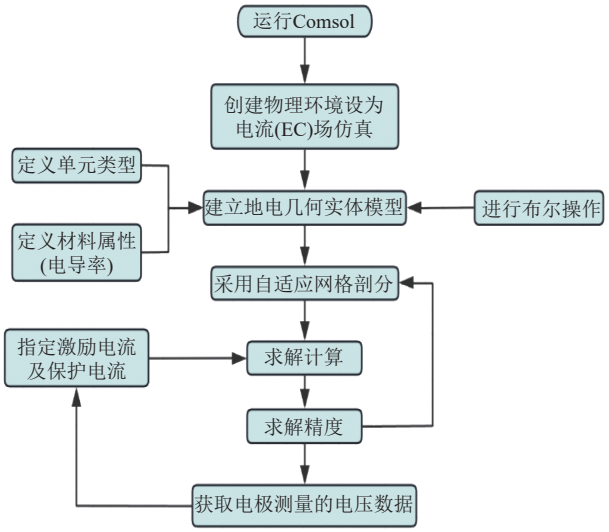


图 2　地下水有限元仿真的具体流程

Fig. 2　The concrete flow of groundwater finite element simulation

一个二维地电双层结构模型, 如图 3 所示。在工程级别的层析成像设备中, 电极通常采用钢管材料。因此, 在我们的模型中, 设定了电极的直径为 90 mm, 长度为 1 m, 电导率设置为 100 S/m。这些电极在基坑底部均匀布置, 总共有 n 个, 从左至右依次编号为 1, 2, …, n。这样的布置旨在模拟实际工程中电极的排列方式, 以确保模拟结果的准确性和实用性。此外对于模型中的弱透水层和含水层, 根据表 1 分别设置了相应的电导率值。

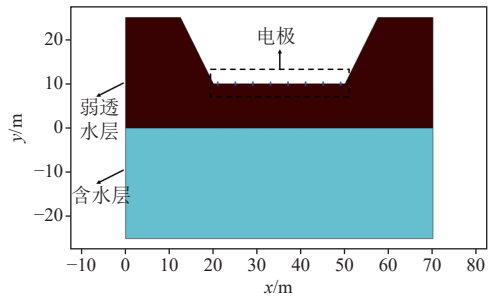


图 3　二维地电双层结构模型几何实体模型

Fig. 3　Two-dimensional geoelectric double-layer structure model geometric entity model

2.3　网格划分

在有限元分析领域, 网格划分是确保模拟精度和提升计算效率的关键环节。本研究使用了自适应网格剖分技术, 并借助自动化网格生成器, 针对二维电场仿真选择了三角形网格作为基础网格类型。在电极布置区域, 实施了密集的网格划分, 而在弱透水层和含水层区域则采取了相对稀疏的划分, 以此平衡计算精度和计算效率。图 4 展示了这种策略下的网格剖分结果, 确保了网格在关键区域实现高精度模拟与在非关键区域的计算资源合理分配。

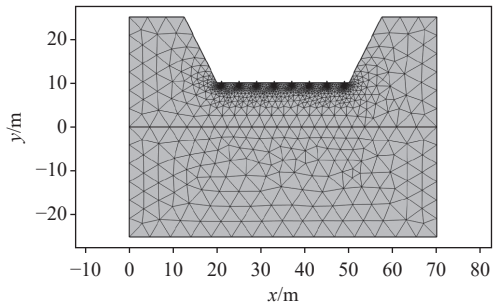


图 4　网格剖分

Fig. 4　The result of meshing

2.4　激励和探测方式

在层析成像技术中, 设备通过测量电极处的电压并进行反演来实现探测。在此过程中, 电极被划分为激励电极和探测电极两种类型。本文以 8 电极配置为例, 详细描述了激励和探测的具体实施方法。具体而言, 在基坑底部均匀布置了 8 个电极, 电极间距设定为 4 m。激励方式如图 5a 所示, 首次激励时, 电极 1 和 2 作为激励电极, 其中电极 1 设置激励电流 0.03 A, 电极 2 接地并设置电压为 0; 电极 3~8 则作为探测电极进行电压测量。如此设置的原因是电极 2 接地并设电压为 0 可作为电势参考点, 形成闭合电流回路, 确保电流从电极 1 流出后经地下介质回流至电极 2, 使地下介质中形成稳定的电流场; 而电极 1 作为激励电流的输出端, 无需接地, 仅需提供设定的电流值, 通过与接地电极的电势差为探测电极提供可测量的电压信号。在第二次激励中, 电极 2 和 3 转换为激励电极, 其中电极 2 设置激励电流为 0.03 A, 电极 3 接地并设置电压为 0; 其余电极 1、4、5、6、7、8 则作为探测电极。这一过程循环进行, 直至完成所有激励和探测组合。在每个探测电极处, 布置了域探针以获取该位置的电势值。通过计算电势差, 可确定相邻两个电极之间的电压。对于 8 电极而言, 按照上述激励和探测方式, 完成一次完整的测量过程需要进行 7 次激励, 从而获得总共 35 个数据点。这些数据如图 5b 所示。由于每次激励时激励电极对(如电极 1-2、电极 2-3 等)依次向右移动, 当探测电极分别位于激励电极对的两侧时, 因两侧电场梯度方向相反, 会导致探测电极间的电势差呈现负值; 且此时两探测电极距离较远, 电势差绝对值较大, 因此图 5b 中会出现较大的负电压值。结合图 5a 的激励方式, 共有 5 次探测电极位于激励电极对两侧的情况, 对应图 5b 中的 5 个较大负电压值。通过这种激励和探测方式, 我们能够系统地收集电压数据, 为反演提供必要的基础数据。

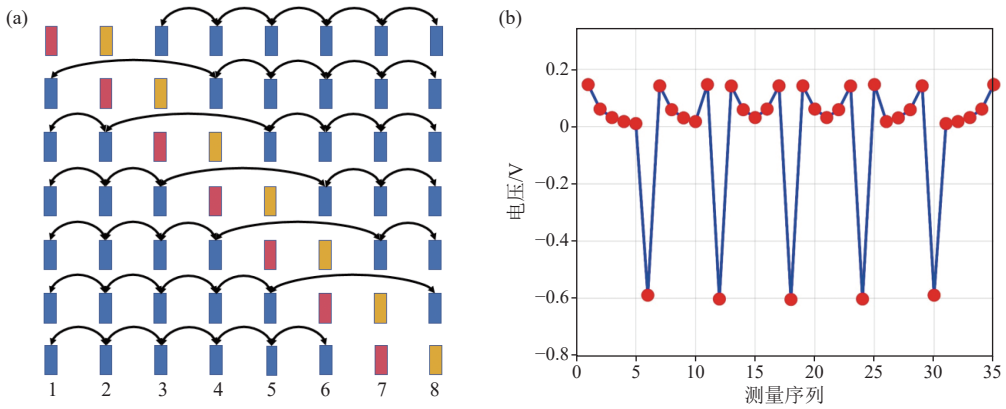


图 5　激励方式(a)及探测电极间的电压(b)

Fig. 5　Excitation mode(a) and voltage between detection electrodes(b)

3　地下水探测正演模拟分析

3.1　不同深度地下水探测的电极响应

设置电极数量为 8 个，均匀布置在基坑底部，采用图 5a 所示的激励方式进行激励，在不同激励电极下，电势的分布结果如图 6 所示。可以看到由于激励电极的位置不同，等势线的分布会产生变化，利用这种方式可以获取多组数据，为地下水探测反演提供了数据支撑。

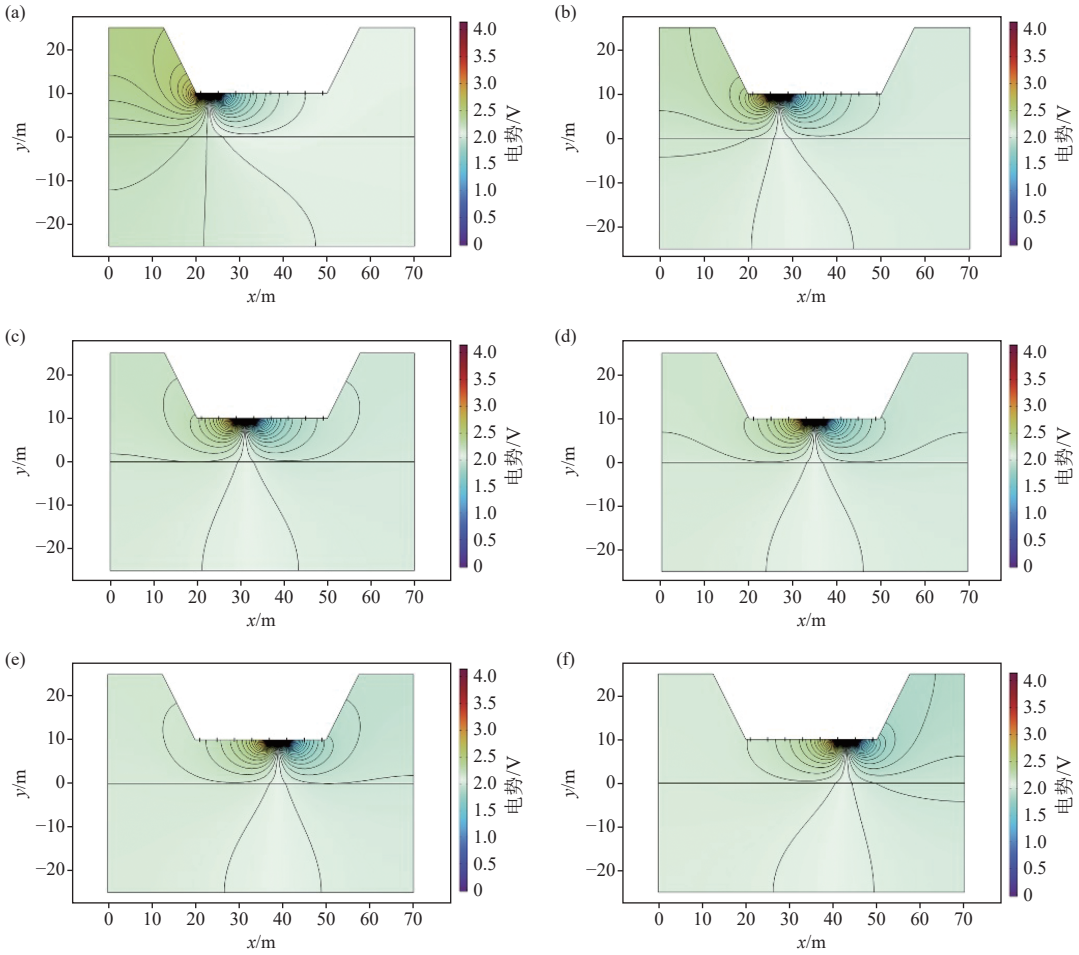


图 6　不同激励电极对下的电势分布:(a)电极 1、2 激励,(b)电极 2、3 激励,(c)电极 3、4 激励,(d)电极 4、5 激励,(e)电极 5、6 激励,(f)电极 7、8 激励

Fig. 6　Potential distribution under different excitation electrode pairs:(a) with electrodes 1 and 2 excited, (b) with electrodes 2 and 3 excited, (c) with electrodes 3 and 4 excited, (d) with electrodes 4 and 5 excited, (e) with electrodes 5 and 6 excited, (f) with electrodes 6 and 7 excited

通过改变地下水距离基坑底部的距离, 能够获取不同深度的地下水电极探测数据。我们分别模拟地下水距离基坑底部 10、20、30、40、50 m 的情况, 电极数据分布如图 7 所示, 图中测量序列就是测量了 35 次探测电极间的电压, 在 8 电极下每一次激励对应 5 个电压值, 共 7 次激励, 即 35 个测量值。可见不同深度地下水对应的电极数据在最大值与最小值处有所不同。

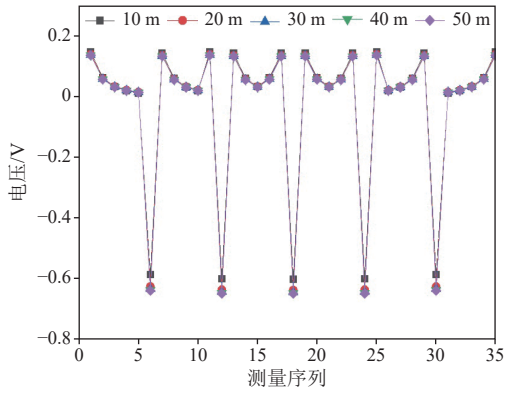


图 7　不同深度地下水探测的电极响应

Fig. 7　Electrode response in groundwater exploration at different depths

在本研究中, 我们旨在探究地下水深度与电极探测的电压数据之间的相关性。为此, 通过数值模拟获取了不同地下水深度对应的电极探测的电压数据, 并从中提取了最大值与最小值。通过对这些数据进行数学拟合, 能够进一步分析深度与电极探测的电压值之间的关系, 相关结果详见图 8, 可见电极探测的电压最大值与最小值均与地下水深度呈现出显著的指数关系。需说明的是, 该指数关系基于本研究固定的激励电流(0.03 A)条件。根据欧姆定律, 激励电流变化会直接影响电压值: 当电流增大时, 相同地层下的电压成比例增大, 可能提升深部信号可观测性; 当电流减小时, 电压信号衰减, 会限制探测深度。因此, 实际应用中需结合地层电阻率、仪器灵敏度调整电流强度, 后续可进一步研究“电流—电压—深度”耦合关系以完善模型。

地下水与基坑底部的距离(即地下水深度)与电极探测的电压最大值之间的关系可以通过以下数学模型来描述:

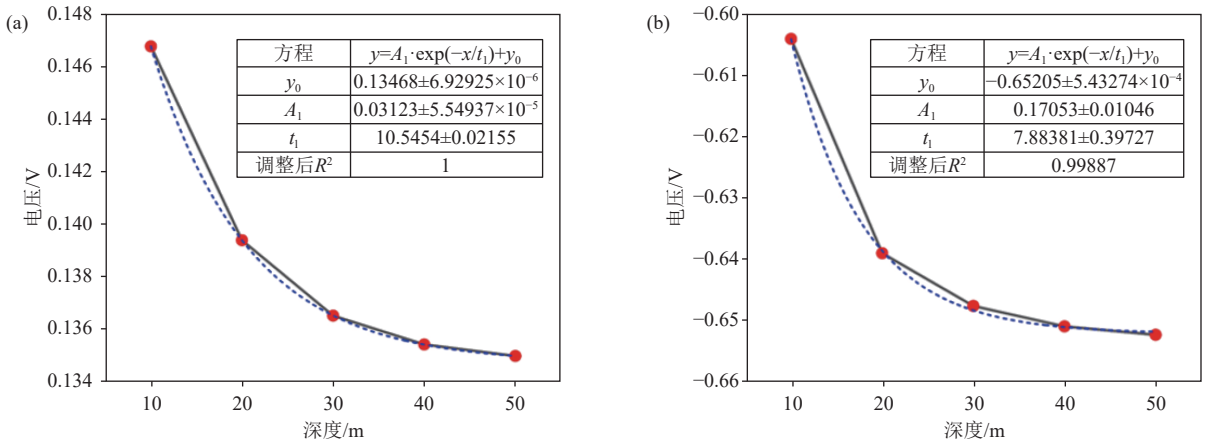
$$y_{\max}=0.03123\times\exp\left(\frac{-x}{10.5454}\right)+0.13468, \qquad (2)$$

该模型基于数据拟合建立, 其拟合优度 R^2=1, 表明拟合效果极为理想。式中: $y_{\max}$表示电极探测的电压最大值; x表示地下水与基坑底部之间的距离。电极探测的电压最小值与地下水深度之间的关系遵循相同的规律, 可以用类似的形式表达:

$$y_{\min}=0.17053\times\exp\left(\frac{-x}{7.88381}\right)-0.65205, \qquad (3)$$

其拟合优度 R^2 接近 1, 拟合效果也较为理想。式中: $y_{\min}$表示电极探测的电压最小值。可以发现, 随着地下水位与基坑底部距离的增加, 电极探测的电压最大值和最小值呈现出特定的变化趋势。具体来说, 当地下水位越深时, 电极探测的电压最大值越大, 而最小值越小。这一趋势反映了电极在探测不同深度地下水影响下的响应特性。

然而, 随着地下水深度的进一步增加, 最大电压与最小电压的增幅逐渐减小, 变化趋势趋于平缓。这种趋势表明, 在电极数量固定的情况下, 电阻层析技术能够探测到的地下水深度是有限的。这可能是



a—地下水深度与其对应的最大电压值的关系; b—地下水深度与其对应的最小电压值的关系

a—correlation between groundwater depth and corresponding maximum voltage; b—correlation between groundwater depth and corresponding minimum voltage

图 8　地下水深度与电极数据的关系

Fig. 8　Relationship between groundwater depth and electrode data

因为随着探测深度的增加，信号的衰减和噪声的影响变得更加显著，导致探测深度受到限制。

3.2　电极数量对地下水探测深度的影响

本节研究旨在评估电极数量对地下水探测深度的影响，我们设计了 3 种不同配置的电极分布模式：8 电极、10 电极和 12 电极。对于每种配置，我们分别模拟了地下水深度从 10~100 m（以 10 m 为间隔）的电势分布，并统计了不同电极数量下探测到的电压最大值，结果如图 9 所示。本研究中，最大有效探测深度的界定基于电压信号的可区分性，若电压极值变化较小，表明电极响应已无法有效区分不同深度的地下水分布。对比分析表明，3 种电极布置方式的最大地下水探测深度均稳定在约 40 m。这表明，在基坑尺寸固定的前提下，单纯增加电极数量无法显著提升最大探测深度。其根本原因在于：增加电极主要提高了数据的横向密度，而非增强电场在垂向的穿透能力。从理论上看，探测深度由地下电场的分布范围决定，主要受控于 3 类因素：装置参数

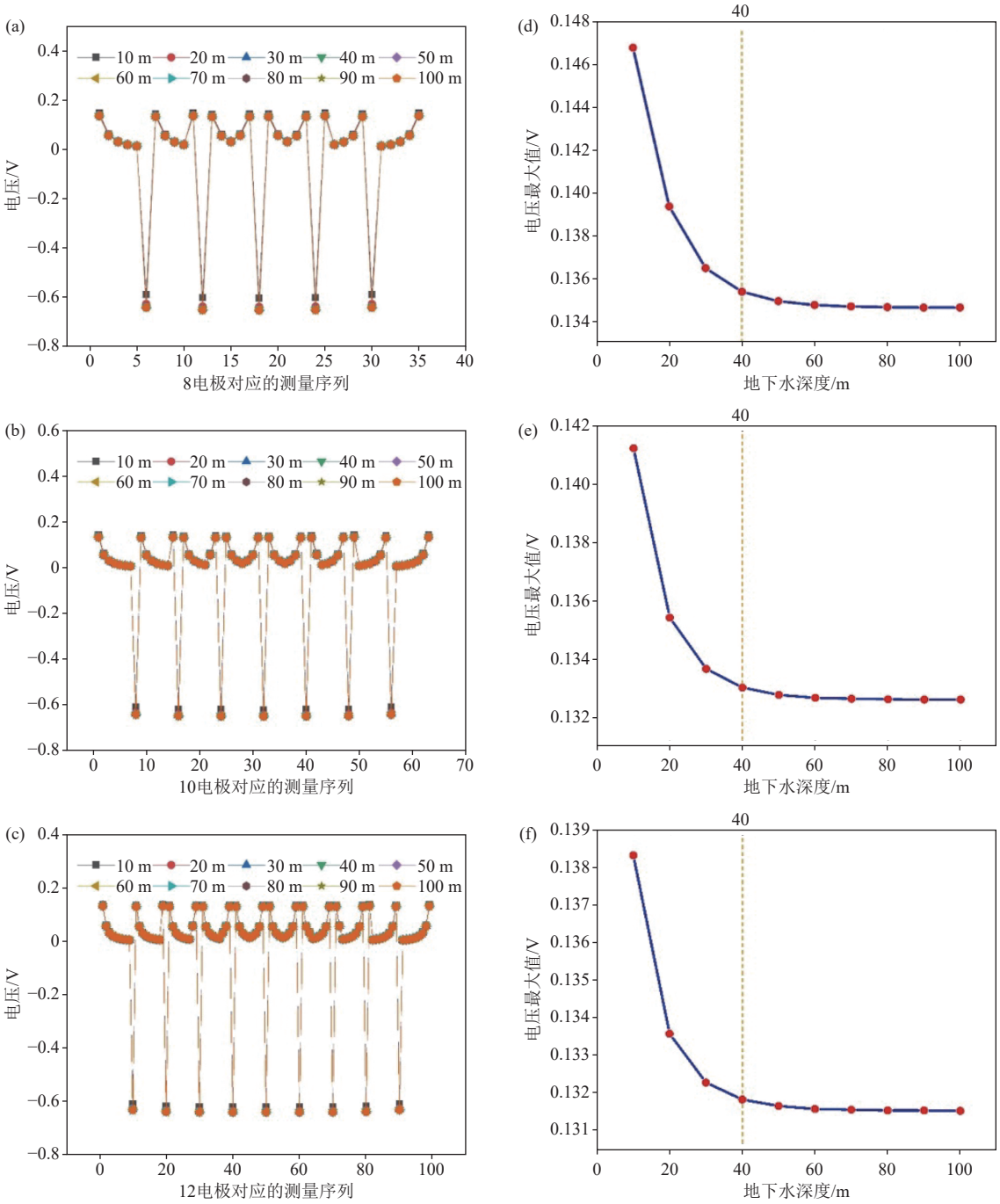


图 9　不同电极数量下探测电极间的电压（a）、（b）、（c）及其对应的最大探测水深（d）、（e）、（f）

Fig. 9　Voltages between detection electrodes (a), (b), (c) and the corresponding maximum detection depths (d), (e), (f) for different numbers of electrodes

中, 电极数量主要影响横向数据密度, 而极距(如激励电极间距)和排列方式直接决定电场垂向穿透能力, 这也是单纯增加电极数量无法扩大探测范围的原因; 供电参数(如电流强度、波形)影响信号强度与抗干扰能力, 稳定且强度适宜的电流可缓解深部信号的衰减; 地层电性参数(如电阻率分层、各向异性)显著影响电流传播, 如弱透水层与含水层的电导率差异(表 1)会改变电流路径, 进而限制或拓展探测深度。值得说明的是, 本次数值模拟是基于理想化条件下的理论分析, 暂未引入环境噪声和仪器灵敏度参数, 在实际工程应用中, 上述因素会进一步压缩有效探测深度。因此, 从资源效益角度考量, 增加电极数量并非是提升地下水探测深度的有效途径, 本文聚焦电极数量展开分析, 正是针对工程中"盲目增极降低效率"的共性问题, 建议通过改变激励电极间距(极距)、优化供电电极布置及调整供电模式等方式探索提升探测深度的有效途径, 后续拟通过正交试验量化多参数交互作用, 构建探测深度预测模型, 为实际工程中的参数优化提供依据。

4　分析与结论

本研究构建了一个双层结构含水模型, 并运用有限元数值仿真模拟技术, 旨在深入探讨直流电阻率法在基坑地下水探测中的应用效果及其局限性。通过研究发现, 电极探测得到的电压极值与地下水深度之间存在显著的指数关系, 这表明直流电阻率法在探测地下水深度方面具有潜在的应用价值。然而, 随着地下水深度的增加, 信号衰减和噪声干扰也随之增强, 这限制了探测的有效深度, 模拟结果显示在本文的参数设定以及激励方式下, 直流电阻率法的最大有效探测深度约为 40 m。

进一步分析表明, 在基坑尺寸保持不变的情况下, 单纯增加电极数量并不能显著提高探测的深度。这是因为电极数量的增加并不会增强电场在垂向的穿透能力。因此, 为了提高探测深度, 需要考虑其他方法, 如优化电极布局、调整供电模式等。综上所述, 直流电阻率法在基坑地下水探测中具有一定的应用前景, 但也面临着信号衰减和噪声干扰等技术挑战, 需要进一步的研究和技术创新以克服这些限制来满足更大范围的探测。

参考文献(References):

[1] Wang J, Feng B, Yu H, et al. Numerical study of dewatering in a large deep foundation pit[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(3): 863−872.

[2] 闫建波, 余永鹏, 杨彦成, 等. 采煤工作面地下水分布变化的综合物探应用研究 [J]. 煤炭技术, 2024, 43(10): 96−101.
Yan J B, Yu Y P, Yang Y C, et al. Comprehensive geophysical application study on groundwater distribution change in coal mining face[J]. Coal Technology, 2024, 43(10): 96−101.

[3] 晏雁. 瞬变电磁三维成像在煤矿含水体探测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(1): 43−49.
Yan Y. Application of TEM 3D imaging in water content detection of coal mine[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2023, 20(1): 43−49.

[4] 于思佳. 复杂噪声环境下磁共振地下水探测信号高精度提取方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
Yu S J. Research on high-precision extraction method of magnetic resonance sounding signal in complex interference environments [D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[5] 刘圣博, 刘盼, 黎义勇, 等. 高密度电法在赣南地区不同地下水赋存类型的探测研究 [J]. 工程地球物理报, 2024, 21(2): 256−266.
Liu S B, Liu P, Li Y Y, et al. Detection research of multiple types of groundwater occurrence by electrical resistance tomography in Ganzhou area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(2): 256−266.

[6] 赵栓峰, 拜云瑞, 黄涛, 等. 基于移动阵列电极的盾构超前探测正演响应分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 214−220.
Zhao S F, Bai Y R, Huang T, et al. Forward response analysis of shield advanced detection with moving array electrode[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(1): 214−220.

[7] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1529−1538.
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1529−1538.

[8] 马炳镇, 李貅. 矿井直流电法超前探中巷道影响的数值模拟 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 78−81.
Ma B Z, Li X. Numerical simulation of roadway influences on advanced DC detection in underground mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(1): 78−81.

[9] 鲁晶津, 吴小平. 巷道直流电阻率法超前探测三维数值模拟 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(6): 83−86.
Lu J J, Wu X P. 3D numerical modeling of tunnel DC resistivity for in-advance detection[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(6): 83−86.

[10] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 隧道含水构造电阻率法超前探测正演模拟与应用 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(1): 246−253.
Liu B, Li S C, Li S C, et al. Forward modeling and application of electrical resistivity method for detecting water-bearing structure in tunnel[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(1): 246−253.

[11] Zhou N, Vermeer P A, Lou R, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3-4): 251−260.

[12] Li M G, Chen J J, Xia X H, et al. Statistical and hydro-mechanical

coupling analyses on groundwater drawdown and soil deformation caused by dewatering in a multi-aquifer-aquitard system[J]. Journal of Hydrology, 2020: 125365.

[13] 周志芳, 郭耿新, 汪北华, 等. 深基坑降水的双层结构模型及有限元计算 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 179−183.
Zhou Z F, Guo G X, Wang B H, et al. Double-layer structure model and FEM calculation of dewatering of deep foundation pits[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2004, 32(2): 179−183.

[14] 赵宇豪, 童立元, 朱文骏, 等. 不同止水帷幕插入深度下基坑降水对周边环境的影响预测分析 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(5): 126−131.
Zhao Y H, Tong L Y, Zhu W J, et al. Prediction and analysis of the influence of foundation pit dewatering on the surrounding environment under different water stop curtain insertion depth[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(5): 126−131.

[15] Zheng Y, Xiong J, Liu T, et al. Performance of a deep excavation in Lanzhou strong permeable sandy gravel strata[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(4): 1−17.

[16] 薛禹群. 地下水动力学 [M]. 第 2 版. 北京: 地质出版社, 1997.
Xue Y Q. Groundwater hydrodynamics [M]. 2nd Edition. Beijing: Geological Publishing House, 1997.

[17] 卡明斯基. 地下水动力学原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1956.
Kaminsky. Principles of groundwater hydrodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1956.

[18] 项鹏飞, 崔允亮, 王新泉. 含水率与含砂率对软黏土电渗透系数的影响试验研究 [J]. 铁道建筑, 2017, 57(12): 75−77.
Xiang P F, Cui Y L, Wang X Q. Experimental study on influence of water content and sand content on electroosmosis coefficient of soft clay[J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 75−77.

[19] 杨以诚. 非饱和路基土电渗排水数值模拟及水分迁移研究 [J]. 交通科技, 2023(1): 1−4, 28.
Yang Y C. Bearing properties and settlement characteristics of PHC pipe pile reinforced airport subgrade[J]. Transportation Science & Technology, 2023(1): 1−4, 28.

[20] 邓智中. 滨海地区基坑降水自动监测及智能决策系统研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
Deng Z Z. The research on automatic monitoring and intelligent decision system of foundation pit dewatering in coastal area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.

Forward modeling of groundwater detection in foundation pits based on the direct current resistivity method

LIANG Chao [1, 2, 3], DENG Xi-Fei [1, 2, 3], SHEN Zhi-Jun [1, 2, 3], LI Hong-Bo [1, 2, 3], WANG Tao [1, 2, 3]

(1. *China Railway No. 4 Engineering Group Co., Ltd., Hefei* 230026, *China*; 2. *Engineering Technology Research Institute of China Railway No.4 Engineering Group, Hefei* 230026, *China*; 3. *Urban Rail Transit Professional Research and Development Center of China State Railway Group Co., Ltd., Hefei* 230026, *China*)

Abstract: With the increasing demand for groundwater detection accuracy in foundation pit engineering, the direct current resistivity (DCR) method has attracted widespread attention for its application potential in groundwater detection. This study investigated the application potential of the DCR method through numerical simulations. A two-layer structure model was constructed to analyze the impacts of the groundwater level depth on electrode response and the relationship between the number of electrodes and the detection range. The results indicate that a significant exponential relationship was observed between the extreme voltage values obtained from electrode detection and the groundwater level depth, demonstrating the potential of the DCR method in detecting the groundwater level depth. However, the increasing groundwater level depth led to intensified signal attenuation and noise interference, limiting the detection depth of the DCR method. Additionally, simply increasing the number of electrodes could not broaden the detection range effectively. Instead, it is necessary to enhance the imaging capability of the DCR method by changing the electric field distribution. Overall, this study provides a theoretical basis for the application of the DCR method in groundwater detection while presenting the challenges in practical applications.

Key words: direct current resistivity (DCR) method; foundation pit; numerical simulation; groundwater detection

(本文编辑: 王萌)