doi: 10.11720/wtyht.2026.1264
姚金, 欧阳锋, 王凌, 等. 钻孔电法检测桩基深度可行性研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 732-738. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1264
Yao J, Ou Y F, Wang L, et al. Feasibility of detecting pile foundation depths based on the borehole electrical method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 732-738. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1264

钻孔电法检测桩基深度可行性研究

姚金[1], 欧阳锋[1], 王凌[1], 刘红兵[1], 陈涛[2,3]
(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510420; 2. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京) 地球物理学院, 北京 102249)

摘 要: 桩基深度检测是城市环境下工程施工的重要环节, 但目前传统方法常存在精度不足的问题。桩基的主要成分是混凝土和钢筋, 其电导率与背景存在差异, 且电法勘探对地下电导率变化敏感, 为检测桩基埋深提供了新的可能性。本文以广州地铁工程施工中常见的桩基为参考, 通过数值模拟, 分析了偶极—偶极和温纳装置在探测桩基埋深方面的性能。利用随机森林法预测桩基深度。结果表明, 两种装置均能观测到 30 m 以浅的桩基产生的电势差和视电阻率响应。在经过 1 000 个样本训练后, 随机森林方法能够准确、快速地预测桩基埋深, 且对噪声具有较强的鲁棒性。钻孔电法在桩基埋深检测中展现出良好的应用前景, 随机森林方法的应用为快速、准确地预测桩基的埋深提供了有效工具。

关键词: 广州; 桩基深度; 钻孔电法; 随机森林; 数值模拟
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0732-07

0 引言

桩基是一种深基础形式, 通过将长而细的柱状结构(桩)打入地下, 将建筑物的荷载传递到更深、更坚固的地层。桩基广泛应用于城市高层建筑、桥梁等工程中, 以确保结构的稳定性和安全性。桩基检测在城市工程施工中具有重要意义, 其质量情况直接关系到建筑物的安全与耐久性。通过检测桩基的完整性、承载力和埋深等参数, 可以及时发现施工中的问题, 避免潜在的安全隐患, 从而保障工程质量。

近年来, 桩基检测技术显著提升。国内外常用的桩基检测方法包括静载荷试验、低应变法、高应变法、钻芯法和声波透射法等[1], 这些方法涉及多种参数, 但各有局限性。目前, 电法勘探可在一定程度上有效探测未知深度的桩基, 确定桩身位置和区域, 但精度仍有不足。如何布设电极以更精确地检测未知桩基的尺寸、壁厚和完整性等参数, 是桩基检测工程中的关键问题[2-13]。此外, 基于机器学习和人工智能的地球物理数据智能处理方法逐渐受到关注, 为城市工程施工中的实时处理需求提供了可靠技术支持[14-17]。

本文以直流电法为研究手段, 通过数值模拟探究桩基旁检井中电法检测桩基深度的可行性。研究将分析电法观测数据, 为电法检测桩基深度提供依据, 通过数值模拟算例验证该方法的有效性与可行性, 并利用随机森林方法进行预训练以提高桩基检测的精度和效率, 来满足城市工程施工对桩基深度检测的实际需求。

1 研究方法

电法勘探解决问题的前提是目标体和围岩存在电阻率差异, 并且这种差异能够被仪器所捕获。为此, 本文基于工程常见桩基, 构建电阻率模型, 模拟布设偶极—偶极装置和温纳装置获取测量的电势差和视电阻率数据, 通过数据分析钻孔电法对于桩基深度的敏感程度。将电势差数据作为输入, 通过随

收稿日期: 2025-07-28; **修回日期**: 2025-11-03
基金项目: 广州地铁设计研究院股份有限公司科研项目 (KY-2020-054)
第一作者: 姚金(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工程物探。Email: 37314585@qq.com
通讯作者: 陈涛(1990-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为应用地球物理。Email: chentaosx@hotmail.com

机森林法预测桩基深度, 探究钻孔电法预测桩基深度的可行性。

1.1　桩基模型电阻率

工程中常见的桩基类型包括管桩、素混凝土桩和钢筋混凝土桩, 其中管桩直径约 0.4~0.6 m, 素混凝土桩直径约 0.8~1.8 m, 钢筋混凝土桩直径约 0.8~2.2 m, 桩基埋深一般在 30~40 m 以浅。由于其材质差异, 不同类型桩基的电导率显著不同; 即便对于同一类钢筋混凝土桩, 其内部钢筋含量的变化也会引起电导率的改变。为系统覆盖常见桩型并服务于后续数值模拟与可行性分析, 本研究将桩基直径设定在 0.4~2.2 m 范围内, 埋深在 8~30 m。

桩基电导率是数值模拟的关键参数, 研究模拟场景为广州市地铁施工中的桩基检测, 区域地质以软土为主, 年降雨量超过 1 600 mm, 地下水位高, 背景土壤电导率约为 0.01~0.1 S/m。素混凝土桩湿态电导率约 0.01~0.02 S/m, 与土壤相当, 在湿润条件下电法检测分辨率低, 故不作为重点; 研究主要关注钢筋混凝土桩和管桩, 这些在广州常见, 用于支撑桥梁和高楼。钢筋混凝土桩基体电导率为 0.01~0.02 S/m, 但钢筋提升有效电导率达 0.3 S/m, 湿环境下氯离子渗透可进一步增加导电性[18-21]; 管桩碳钢导电率远高于土壤, 但是防腐涂层会一定程度降低电导率[22]。综合以上信息, 模拟中设置桩基电导率为 0.05~10 S/m, 背景电导率设置为 0.01 S/m。

1.2　观测装置

根据实际施工的条件, 模拟在距桩基一定距离的钻孔内布设电极, 分别模拟偶极—偶极装置、温纳装置下的电法观测数据。

偶极—偶极装置是按照 A、B、M、N 依次等间距排列的四极装置, 如图 1 所示。其中 A、B 为供电电极, M、N 为接收电极。测量时, 设定 AB=BM=MN=1.5 m, A、B、M、N 同时向下移动, 隔 1 m 测量一次。最终获取到一条沿钻孔测量的 ΔU_{MN} 曲线。

温纳装置按照 A、M、N、B 依次等间距排列, 如图 1 所示, A、B 为供电电极, M、N 为测量电极。测量时, 设定 AM=MN=NB=1.5 m, A、B、M、N 同时向下移动, 隔 1 m 测量一次。测量时, 同时移动 A、M、N、B 最终获取一条沿钻孔 ΔU_{MN} 的测量曲线。

当供电电极和测量电极都位于钻孔中, 采用镜像法处理地表的绝缘边界效应。在供电电极 A 和 B 的镜像点(以地面为对称面)引入与电流强度相同的虚拟供电电极 A'和 B', 推导可得钻孔中视电阻率公式:

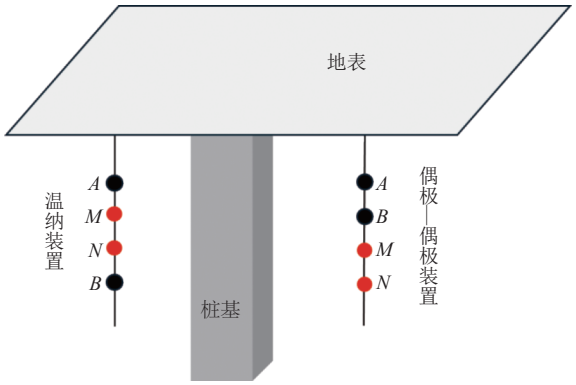


图 1　桩基检测示意

Fig. 1　Schematic of pile foundation detection

$$\rho_a = K\frac{\Delta U_{MN}}{I}, \qquad (1)$$

式中: 装置系数 $K = 4\pi\Big/\left[\left(\frac{1}{r_{AM}}-\frac{1}{r_{AN}}\right)+\left(\frac{1}{r_{A'M}}-\frac{1}{r_{A'N}}\right)-\left(\frac{1}{r_{BM}}-\frac{1}{r_{BN}}\right)-\left(\frac{1}{r_{B'M}}-\frac{1}{r_{B'N}}\right)\right]$, r_{xy} 为 x 和 y 点之间的距离。

1.3　模拟程序

采用 RESnet 直流电法程序进行钻孔中不同装置下桩基数值的模拟[23]。该程序基于基尔霍夫电流定律, 利用电路分析方法进行直流电法的数值模拟。通过定义体电导、面电导、线电导, 程序可以模拟不同的电导结构, 能够灵活应对各种场景。

1.4　基于随机森林的桩基深度预测

对于钻孔中的电法测量数据, 采用传统反演方法估计桩基深度的非唯一性高, 这源于数据携带的信息量有限, 而地下的模型空间较大。机器学习方法适合表征复杂的非线性关系, 本文采用随机森林方法进行桩基深度估计。随机森林采用多棵树进行回归估计, 采用平均作为结果, 有利于提高决策的稳定性。

2　算例研究

2.1　钻孔电法对于桩基深度的敏感度分析

工程施工中为保障建筑安全, 且同时兼顾检测的效果, 通常在桩基旁侧 1 m 左右的地方布设钻孔。为此, 本文设计 3 种钻孔距(钻孔和桩基之间的距离), 即 0.5 m, 1.0 m 和 1.5 m, 用以探究不同情况下, 钻孔电法对于桩基深度的可探测性。模拟中设置桩基埋深 8 m, 由于电法测量具有体积效应, 模拟中还测试了桩基的直径对于探测效果的影响, 桩基直径分别设置为 0.4 m, 1.0 m, 2.0 m。桩基电导率设置为 1 S/m, 背景电导率设置为 0.01 S/m。

图 2 展示了偶极—偶极装置下不同桩基直径、不同钻孔距对于桩基深度探测的效果。其中图 2a~

c 为电势差曲线，图 2d~f 为视电阻率曲线。第一列桩基直径为 0.4 m，第二列桩基直径为 1.0 m，第三列桩基直径为 2.0 m。当桩基直径固定时，可以明显看到钻孔距越小，电势差曲线和视电阻率曲线都会在桩基消失的地方产生明显的变化，且随着钻孔距增大至 1.5 m，这种变化幅度减弱。当桩基的直径从 0.4 m 变化到 2.0 m 时，可以发现电势差曲线和视电阻率的变化幅度都随着变大、在拐点位置更显著，这与电法的体积效应相关，表明直径大的桩基可探测性更高。

图 3 展示了温纳装置下不同桩基直径、不同钻孔距对于桩基深度探测的效果。和偶极—偶极装置的情况相同，随着钻孔距越小、桩基的直径越大，温纳装置对于桩基的探测效果更为显著。此外，和偶极—偶极装置相比，温纳装置的电势差曲线有先变小后变大的特征，和桩基深度有一定对应关系。考虑施工中的实际条件，应该尽可能在距离桩基近的地方布设钻孔，但距离太近又容易影响建筑安全，综合考虑，可在桩基旁 1 m 处布设钻孔效能较高。

桩基和背景的电导率差异也是影响桩基探测效果的因素。为此，固定钻孔距为 1.0 m，背景电导率为 0.1 S/m，模拟不同桩基直径（0.4 m、1.0 m、2.0 m）且不同桩基电导率（0.05 S/m，0.1 S/m，0.5 S/m，1 S/m）情况下的偶极—偶极装置和温纳装置对于桩基深度的探测效果。

模拟结果显示（图 4、图 5，第一到第三列分别对应桩基直径为 0.4 m、1.0 m、2.0 m），桩基电导率越大，也就是桩基和背景的电导率差异越大，模拟响应曲线的变化也越显著，更有利于探测。当桩基电导率设置为 0.05 S/m，即仅为背景电导率的 5 倍时，模拟响应曲线变化不太明显，表明在实际探测中，桩基类型的变化会影响桩基深度的检测效果。

2.2　基于随机森林的桩基深度预测

获取电法响应数据后，可以采用反演方法预测桩基深度，但地铁施工中的桩基检测仅在单口井中获取，数据量少，反演模型空间较大，解的非唯一性较高，并且反演耗时长，工程施工中的时效性差。本文采用正演数值模拟方式生成样本，并采用随机森林方法进行模型训练，最后将训练好模型用于测试。

随机森林（random forest）是一种集成学习算法，由 Leo Breiman 于 2001 年提出[24]。它通过构建多棵决策树并聚合其预测结果，实现高准确率和噪声鲁棒性预测，适用于回归任务，如桩基深度预测。该算法的核心在于引入随机性，减少过拟合，提高泛化能力。随机森林方法的核心机制包括：①Bootstrapping（自助采样）：从原始数据集中有放回抽样，生成多个子样本集，确保每棵树在略微不同的数据上训练；②随机特征选择：在每个决策树节点分裂时，仅从随机特征子集中选择最佳分裂特征，增加树间多样性；③集成聚合：对于回归任务，取所有树预测值的平均作为最终输出，降低单个树的偏差和方差。

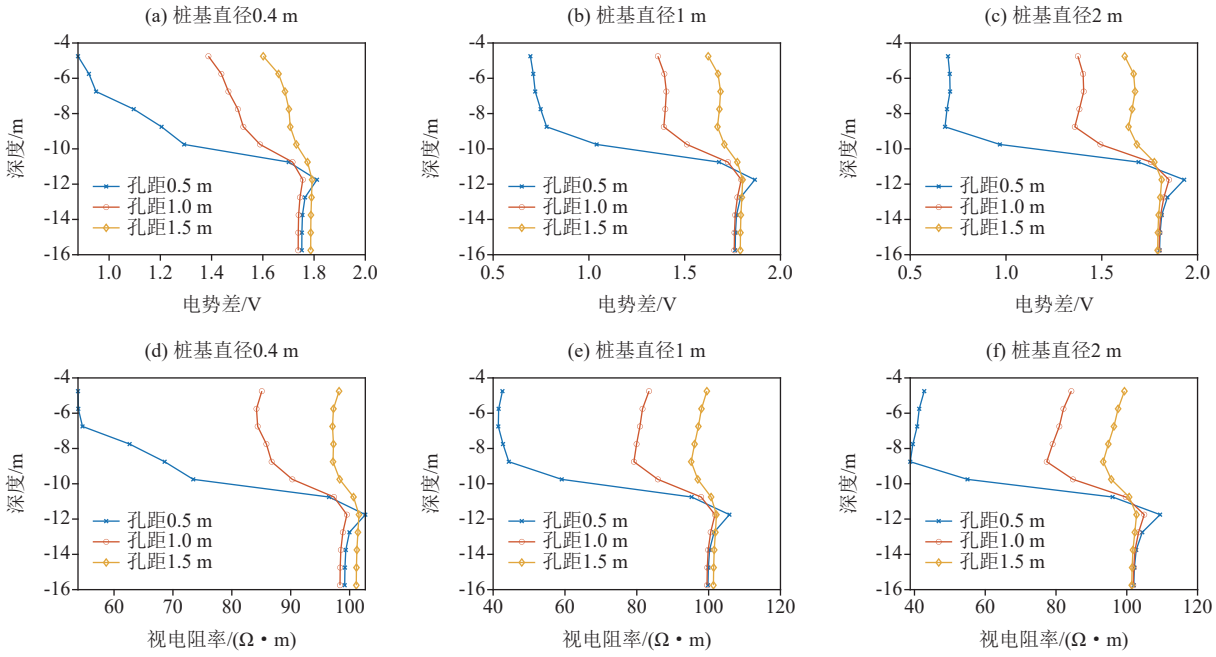


图 2　偶极—偶极装置不同钻孔距对于桩基深度的探测性影响

Fig. 2　Influence of different borehole-pile spacings on the detection capability of pile foundation depth using the dipole-dipole array

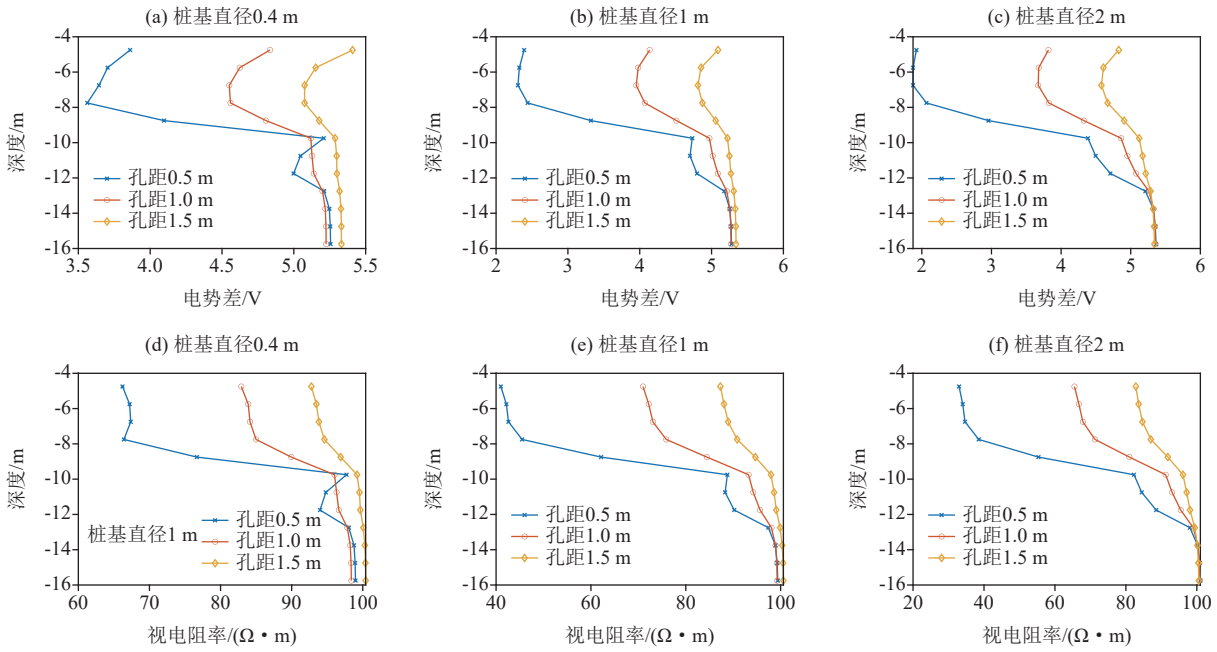


图 3　温纳装置不同钻孔距对于桩基深度的探测性影响

Fig. 3　Influence of different borehole-pile spacings on the detection capability of pile foundation depth using the Wenner array

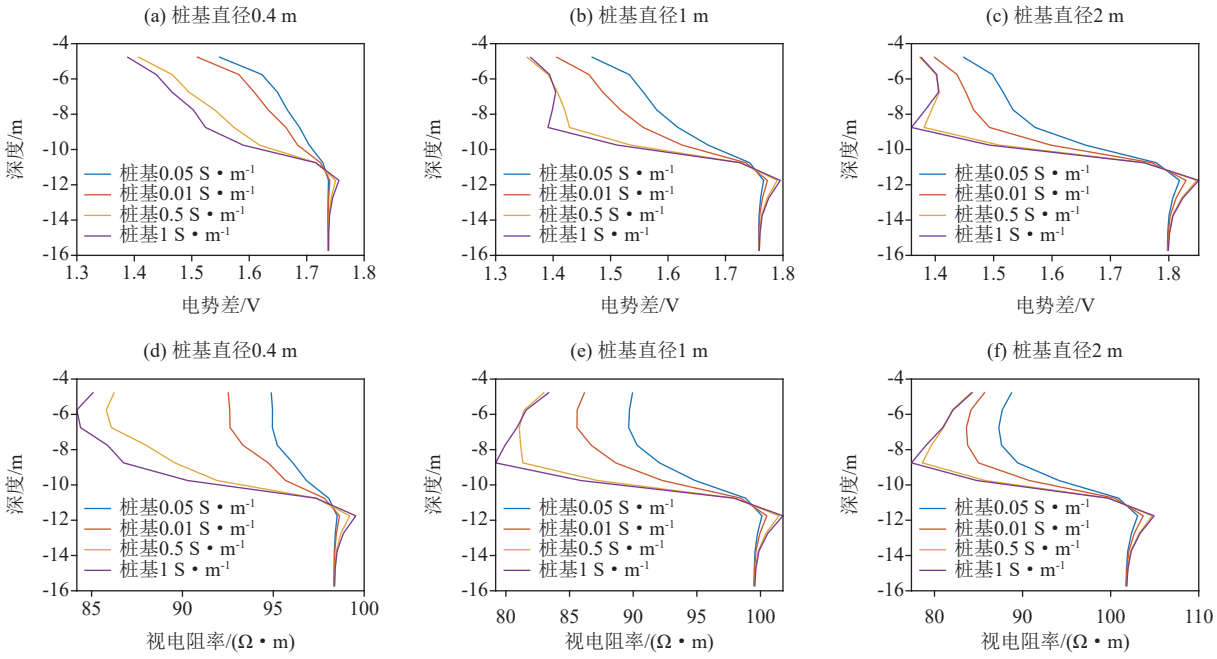


图 4　偶极—偶极装置不同桩基电导率对于桩基深度可探测性影响

Fig. 4　The influence of different pile foundation conductivities on the detectability of pile foundation depth under dipole-dipole array configuration

因为有多个树的结果作为输出, 随机森林模型也可用来评价预测值的不确定度。

随机森林方法分为构建和预测两个过程。构建过程包括初始化、生成样本、构建决策树和生成模型。预测过程就是利用训练好的随机森林模型和测试样本, 获取每棵树的预测结果, 最后对所有树的结果取平均。随机森林可以适应复杂的非线性回归, 避免反演方法非唯一性和耗时长问题。

在样本生成过程中, 设置桩基电导率从 0.05~10 S/m 对数变化, 桩基深度从 8~30 m 线性变化, 桩基直径从 0.4~2.0 m 线性变化, 共产生 1 000 个样本。从 2.1 小节的敏感性分析结果可知, 温纳装置对于桩基深度的位置更为敏感, 因此, 选用温纳装置进行样本的数值模拟。模拟 1 000 个样本共耗时 20.35 h。

首先用 50 颗树测试不同叶大小对于预测误差

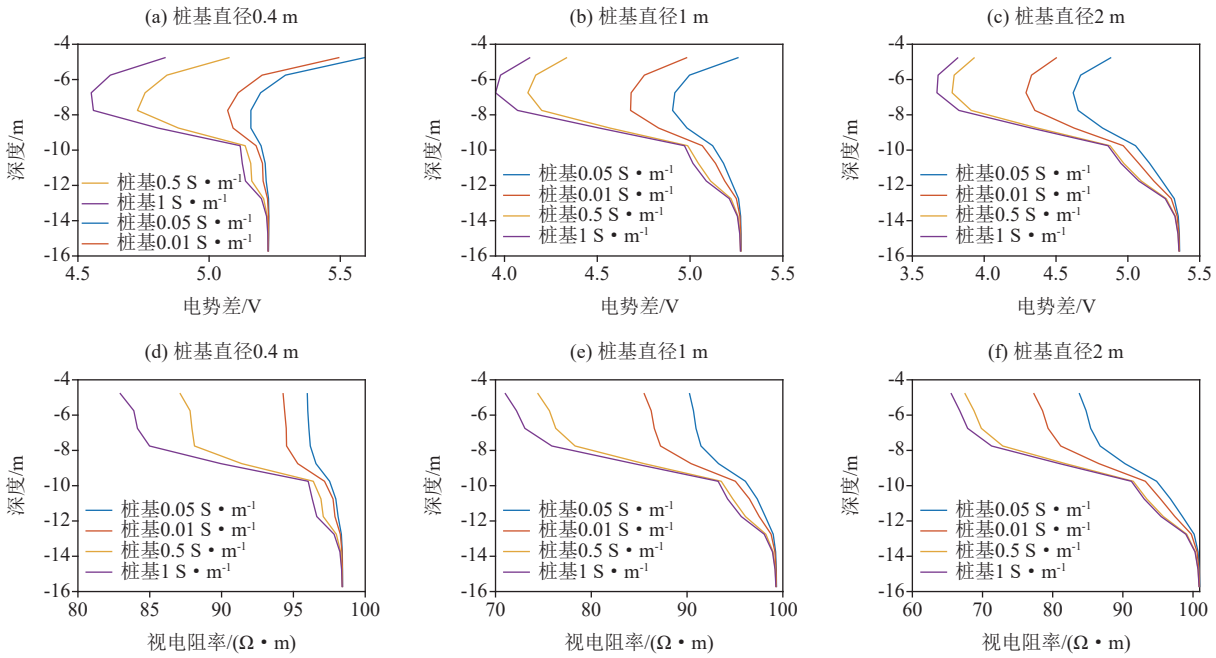


图 5　温纳装置不同桩基电导率对于桩基深度可探测性影响

Fig. 5　The influence of different pile foundation conductivities on the detectability of pile foundation depth under Wenner array configuration

的影响，叶大小设置为 5、10、20、50、100。从预测误差来看(图 6)，叶大小设置为 5 或者 10 较为合适。较大的叶大小可以增加模型的泛化能力，后续选择叶大小为 10。在训练阶段，设置树数量为 100 颗，采用观测的电势差作为输入，桩基深度作为预测值。为模拟实际观测，给每一个电势差数据加入标准差为 0.2 的高斯噪声，整个训练过程耗时 0.62 s。训练过程如图 7 所示，在开始阶段，参与训练的树数量较少，均方根误差较大，当树的个数达到 20 以后，误差得到明显改善，最终 100 颗树训练后均方根误差小于 10^{-3}。

图 8 展示了随机森林模型在测试集上的预测结果及误差分析，其中图 8a 纵坐标表示预测桩基深度

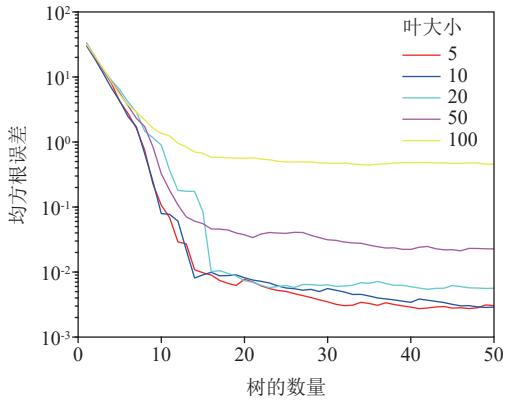


图 6　随机森林方法中不同叶大小对应的预测误差

Fig. 6　Prediction error corresponding to different leaf sizes in the random forest

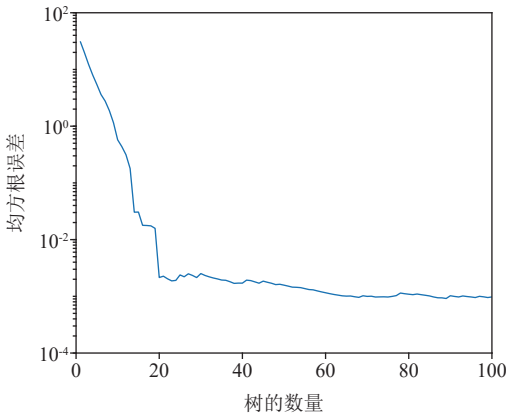


图 7　训练阶段均方根误差随树的数量变化曲线

Fig. 7　Curve of root mean square error variation with the number of trees in the training phase of the random forest

(单位：m)，右侧纵坐标表示预测误差(单位：m)。预测桩基深度与设定值高度吻合，视觉上几乎无明显偏差，整体误差均控制在 0.08 m 以内。图中同一桩基深度对应多个预测误差点，这是由于在样本构建过程中，不同桩基直径和电导率参数可能对应相同的埋深设定，从而引入了额外的模型复杂度。尽管如此，随机森林算法仍表现出色，展现了良好的鲁棒性和适应性。

3　结论

通过数值模拟偶极—偶极装置和温纳装置在钻

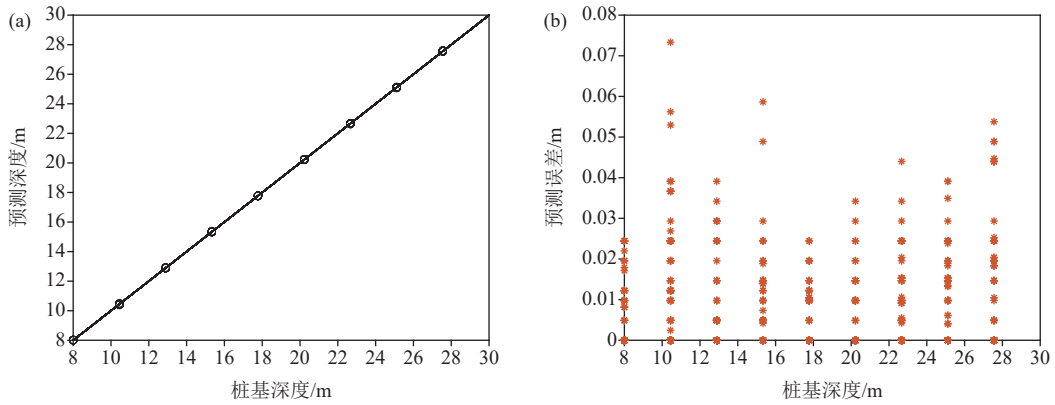


图 8　随机森林桩基预测结果(a)和预测误差(b)

Fig. 8　Prediction results (a) and errors (b) of pile foundation using random forest

孔测量条件下不同桩基类型产生的电势差和视电阻率响应, 利用随机森林估计桩基的深度, 得到如下结论:

1)模拟结果表明, 钻孔偶极—偶极装置和温纳装置获取的电势差和视电阻率响应均对桩基深度敏感。对比分析显示, 温纳装置的模拟响应和桩基深度的对应关系更清晰, 异常特征更易识别, 可作为钻孔桩基检测的电极布设装置。

2)桩基的直径和电导率对于模拟响应的影响较大, 特别是桩基电导率和背景电导率的差异, 决定了电法探测桩基深度的可探测性。模拟证实, 即使在桩基电导率为 0.05 S/m、背景电导率为 0.01 S/m 时(差异仅为 5 倍, 地面电法勘探中一般要求 10 倍以上的电导率差异), 温纳装置仍然能够获取有效信号以识别探测桩基深度, 并且通过减小钻孔与桩基的距离(0.5~1.5 m 之间)可以提高探测精度。

3)基于温纳装置获取的电势差数据, 预训练随机森林模型能够准确预测桩基深度, 预测误差都小于 0.08 m, 并且能够适应不同直径(0.4~2.0 m)和电导率(0.05~10 S/m)的桩基。此外, 随机森林方法对数据中的噪声有较好鲁棒性(常规磁梯度桩基检测法受噪声影响大, 数据处理中的噪声放大效应可能导致检测直接失效)。实际工程运用中, 通过预训练的模型可以实现桩基深度的实时预测。

参考文献(References):

[1] 卓维松. 灌注桩桩基质量检测技术综述 [J]. 西部探矿工程, 2010, 22(8): 16−20.
Zhuo W S. Summary of quality inspection technology of cast-in-place pile foundation[J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(8): 16−20.

[2] Mittal V, Samanta M, Dash R K, et al. Subsurface explorations and investigation of foundation performance for distress assessment of a building[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, 37(2): 04023011.

[3] Hossain M S, Khan M S, Hossain J, et al. Evaluation of unknown foundation depth using different NDT methods[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(2): 209−214.

[4] Khan M S. Evaluation of Resistivity imaging (Ri) method for determining unknown deep foundation depth[M]. Arlington: University of Texas at Arlington,2011.

[5] Tucker S E, Briaud J L, Hurlebaus S, et al. Electrical resistivity and induced polarization imaging for unknown bridge foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(5): 04015008.

[6] Arjwech R. Electrical resistivity imaging for unknown bridge foundation depth determination[M]. College Station: Texas A&M University, 2011.

[7] 胡瑜, 陆愉, 张安安, 等. 高密度电法在建筑桩基检测工程中的应用现状及进展 [J]. 天津科技, 2024, 51(9): 41−44.
Hu Y, Lu Y, Zhang A A, et al. Application status and progress of high density resistivity method in building pile foundation detection engineering[J]. Tianjin Science & Technology, 2024, 51(9): 41−44.

[8] 崔萧. 浅埋桩基的高密度电法数值模拟与探测 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(20): 142−145.
Cui X. Numerical simulation and detection of shallow pile foundation by high-density electrical method[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(20): 142−145.

[9] 万文涛, 郭清石, 邓书鹏. 综合物探方法在岩溶区桩基勘察中的应用分析 [J]. 工程勘察, 2023, 51(7): 72−78.
Wan W T, Guo Q S, Deng S P. Application of comprehensive geophysical prospecting methods in the pile foundation geotechnical investigation in karst region[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(7): 72−78.

[10] 赵驰, 黄伟雄. 既有桩基侵入新建地铁隧道的探测技术及其施工对策——以广州市轨道交通 7 号线区间隧道工程为例 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(10): 17−20.
Zhao C, Huang W X. Detection technology of existing pile foundation invading into new subway tunnel and its construction countermeasures—Taking the tunnel project of Guangzhou Rail Transit Line 7 as an example[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(10): 17−20.

[11] 焉明哲, 王素芳. 高密度电法探测在复杂地质条件下桩基工程中的应用 [J]. 建筑技艺, 2019(S1): 186−187.
Yan M Z, Wang S F. Application of high-density electrical method detection in pile foundation engineering under complex geological conditions[J]. Architecture Technique, 2019(S1): 186−187.

[12] 赵家福. 跨孔超高密度电阻率CT法在建筑物旧有桩基探测中的应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(1): 45−51.
Zhao J F. Application of cross-hole ultra-high density resistivity CT method to detection of old pile foundations in buildings[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(1): 45−51.

[13] 张吉, 师学明, 辛民高. 桩基岩溶注浆模型高密度电法二维正演模拟 [J]. 铁道工程学报, 2011, 28(8): 36−41.
Zhang J, Shi X M, Xin M G. 2D forward simulation of grouting karst for pile foundation with high-density resistivity method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(8): 36−41.

[14] 李国豪, 吕玉增, 董一凡, 等. 基于正演约束的高密度电法半监督学习反演 [J]. 物探与化探, 2025, 49(3): 661−669.
Li G H, Lyu Y Z, Dong Y F, et al. Semi-supervised learning inversion of data derived from high-resolution electrical resistivity tomography based on forward modeling constraints[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(3): 661−669.

[15] 师学明, 黄崇钰, 王瑞, 等. 基于深度学习SSD算法的高密度电法智能解译方法技术研究 [J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(1): 1−11.
Shi X M, Huang C Y, Wang R, et al. High density electrical apparent resistivity anomaly intelligent interpretation method based on SSD target detection algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(1): 1−11.

[16] 余传涛, 李子伦, 薛俊杰. 深度学习在视电阻率快速反演中的研究与应用 [J]. 地球物理学报, 2024, 67(11): 4385−4399.
Yu C T, Li Z L, Xue J J. Research and application of deep learning in rapid inversion of apparent resistivity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(11): 4385−4399.

[17] 姚禹, 张志厚. 基于改进DenseNet的大地电磁智能反演 [J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 759−767.
Yao Y, Zhang Z H. Intelligent inversion of magnetotelluric data based on improved DenseNet[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(3): 759−767.

[18] Cleven S, Raupach M, Matschei T. Electrical resistivity of steel fibre-reinforced concrete—Influencing parameters[J]. Materials, 2021, 14(12): 3408.

[19] Madhavi T C, Annamalai S. Electrical conductivity of concrete[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 11(9): 5979−5982.

[20] Li Z W, Shi F Y, Li L Y. Multiphase modelling of electrical conductivity of concrete with conductive inclusions[J]. Construction and Building Materials, 2025, 464: 140178.

[21] 许真. 基于多相复合理论的水工混凝土电导率测试研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2016.
Xu Z. Research on conductivity test of hydraulic concrete based on multiphase composite theory[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2016.

[22] Yoon I S, Chang C H. Effect of chloride on electrical resistivity in carbonated and non-carbonated concrete[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18): 6272.

[23] Yang D K. RESnet: 3D direct-current resistivity simulation using the equivalent resistor network circuit[J]. Geophysics, 2024, 89(2): F41−F51.

[24] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5−32.

Feasibility of detecting pile foundation depths based on the borehole electrical method

YAO Jin[1], OUYANG Feng[1], WANG Ling[1], LIU Hong-Bing[1], CHEN Tao[2, 3]

(1. *Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou* 510420, *China*; 2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*; 3. *College of Geophysics, China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*)

Abstract: Detecting pile foundation depths is essential for engineering construction in urban areas. However, traditional approaches for this detection mostly exhibit insufficient accuracy. Pile foundations are primarily composed of concrete and steel bars, displaying distinct electrical conductivity from the background values. Electrical methods are sensitive to subsurface conductivity variations, thus providing a novel approach for detecting pile foundation depths. Focusing on typical pile foundations used in the engineering construction of Guangzhou Metro, this study evaluated the effectiveness of dipole-dipole and Wenner configurations in detecting pile foundation depths through numerical simulations. Furthermore, the pile foundation depths were predicted using a random forest model. The results indicate that both configurations could detect the potential differences and apparent resistivity responses of pile foundations at burial depths not exceeding 30 m. After training with 1 000 samples, the random forest model accurately and rapidly predicted the pile foundation depths while showing strong robustness in resistance to noise. Overall, the borehole electrical method exhibits significant potential for detecting pile foundation depths, which, combined with the random forest model, offers an efficient tool for accurate prediction of pile foundation depths.

Key words: Guangzhou; pile foundation depth; borehole electrical method; random forest; numerical simulation

（本文编辑：王萌）