

# 水上高密度电阻率法在公路工程勘察中的应用

文 / 黄 伟 安徽宏泰交通工程设计研究院有限公司

**摘要:** 本文介绍了水上高密度电阻率法在公路工程勘察中的应用。通过分析水上高密度电阻率法的工作原理、技术特点和勘察流程,探讨了该方法在公路工程地质勘察中的具体应用。结合实际工程案例,详细阐述了水上高密度电阻率法在河道地质条件探测、岩土体结构分析、软土分布范围确定等方面的应用效果,并对其优势和局限性进行了分析。研究表明,水上高密度电阻率法能够有效探测水下地质结构,为公路工程勘察提供重要的地质信息支持。

**关键词:** 水上高密度电阻率法; 公路工程勘察; 地质探测; 应用研究

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.05.057

## 引言

随着我国公路建设事业的快速发展,跨河桥梁等水上构筑物日益增多,对水域地质条件的勘察要求也不断提高。传统的工程地质勘察方法在水上环境中存在诸多局限性,难以满足现代公路工程建设的需求。水上高密度电阻率法作为一种新型的地球物理勘探技术,具有探测精度高、施工效率高、无损检测等优点,在水上工程勘察中发挥着越来越重要的作用。

### 一、水上高密度电阻率法概述

#### (一) 基本原理

水上高密度电阻率法是在传统电阻率法基础上发展起来的一种地球物理勘探方法。其基本原理是通过在水面布设电极装置,向地下发射人工电流,测量地下介质对电流的响应,根据电场分布特征反演地下介质的电阻率分布,从而推断地下地质结构和岩土体性质。该方法利用不同地质体具有不同电阻率特征的原理,通过高密度观测系统获取地下电阻率的二维或三维分布图像。水上高密度电阻率法采用多道同步采集技术,可以获得高分辨率的地下电性结构信息,为地质解释提供可靠依据<sup>[1]</sup>。

#### (二) 技术特点

水上高密度电阻率法的技术特点主要体现在其高分辨率、大探测深度、强抗干扰能力、高施工效率 and 无损检测等方面。该方法采用多电极阵列观测系统实现高密度采样,可获得精细的地下电性结构图像,采用先进的数字化采集技术和信号处理方法能够有效抑制各类干扰信号。而且水上作业机动性强,测线布设灵活方便,显著提高了工作效率。同时该方法为无损检测技术,不会破坏原有地质结构,特别适合在环境敏感区域开展地质勘察工作。

#### (三) 勘察流程

水上高密度电阻率法的勘察流程是一个系统的工作过程,从前期准备到最终成果形成需要严格执行每个环节。首先需要收集工程区地质资料并进行现场踏勘,了解水文地质条件和确定测区范围,其次进行仪器设备准备工作,包括检查仪器性能、标定参数以及准备施工船只和安全设施,然后根据勘察任务要求设计测线方案并

布设电极电缆。进入施工阶段后进行电阻率测量和原始数据采集,采集完成后对原始数据进行预处理和反演计算,生成地电模型,最后结合地质资料对反演结果进行综合解释,编制完整的勘察报告。

### 二、在公路工程勘察中的应用

#### (一) 河道地质条件探测

水上高密度电阻率法在河道地质条件探测中发挥着关键作用,能够全面且精确地探测河床的地质状况。在河床覆盖层探测方面,该方法通过分析不同地质体之间的电阻率差异,能够清晰识别河床松散层和淤泥层的分布特征。由于河床松散层和淤泥层的物理性质、含水率及密度存在差异,会表现出不同的电阻率值,通过系统采集和分析电阻率数据,可以准确判断覆盖层的厚度变化、物质组成和工程特性。在基岩面埋深确定方面,基岩与覆盖层之间通常存在显著的电阻率差异,这种差异使得基岩面的空间形态可以被准确圈定,通过布设高密度测点并采用先进的数据处理技术,能够精确描绘基岩面的起伏变化,为桥梁基础设计提供可靠的地质依据。在岩性分区方面,不同岩性因其物质成分、结构特征和含水性的差异,往往呈现出独特的电阻率特征。通过对电阻率异常的定量分析和综合解释,可以有效划分地层的岩性分布范围,构建准确的地质模型。这种高精度的地质信息对于工程设计和施工具有重要的指导意义,能够帮助工程人员更好地了解施工区域的地质条件,制定合理的施工方案,确保工程质量和安全<sup>[2]</sup>。

#### (二) 岩土体结构分析

水上高密度电阻率法在岩土体结构分析中具有独特优势,能够有效识别各类岩土体结构特征。在断层破碎带探测方面,由于断层破碎带通常具有含水率高、结构松散的特点,表现为明显的低电阻率异常。通过对电阻率异常的精细刻画和定量分析,可以准确识别断层破碎带的位置、规模和发育程度,这些信息对于评估工程风险、优化设计方案具有重要意义。在岩溶发育程度评价方面,岩溶发育区域由于溶蚀作用形成的裂隙、溶洞等结构,往往呈现出独特的电阻率异常特征。通过系统分析这些异常,可以准确判断岩溶的发育状况,评估其对工程建设的潜在影响,为工程设计和施工提供重要参

考。在软弱夹层分析方面，该方法能够敏锐地捕捉到软弱夹层的电性异常，通过高分辨率成像技术，可以准确识别软弱夹层的分布位置和空间规模。软弱夹层的存在可能严重影响工程稳定性，因此准确掌握其分布特征对于工程设计和施工方案的优化具有重要的参考价值。此外，通过对电阻率数据的定量解释，还可以评估软弱夹层的工程性质，为地基处理提供科学依据。

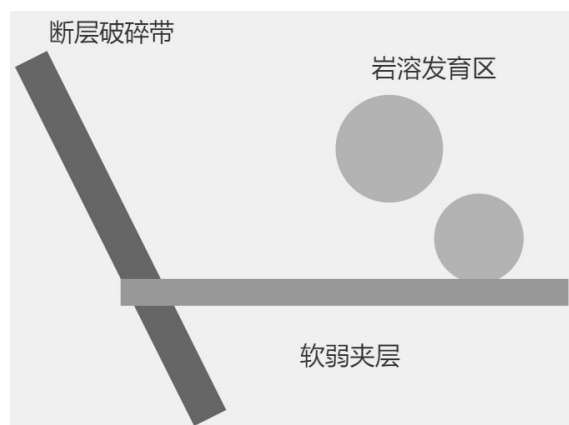


图1 岩土体结构特征示意图

### (三) 软土分布范围确定

水上高密度电阻率法在软土分布范围确定方面表现出显著优势，能够准确圈定软土的三维分布特征。在软土层厚度测定方面，软土因其含水率高、孔隙比大等特点，通常表现为典型的低电阻率异常。通过对电阻率剖面的精细分析，可以准确确定软土层的厚度变化规律。采用高密度的测点布设方案，结合先进的数据处理技术，能够清晰地刻画出软土层的空间展布特征。在平面分布范围划定方面，通过二维或三维电阻率成像技术，可以直观地展示软土在平面上的分布规律，这种立体化的探测手段能够全面揭示软土体的空间展布特征，为工程设计方案的优化提供重要依据。在软土性质评价方面，通过分析电阻率的变化特征，结合地质钻探等其他勘察手段，可以对软土的工程性质进行综合评价，包括含水率、压缩性、强度等关键参数。这些信息对于确定合理的地基处理方案具有重要的指导意义，可以帮助工程技术人员制定科学的施工方案，确保工程质量和安全<sup>[3]</sup>。通过系统的电阻率测量和数据分析，最终建立软土分布的三维地质模型，为工程设计和施工提供全面的技术支持。

## 三、工程应用案例

### (一) 工程概况

某跨江公路桥梁工程横跨宽达300m的河道，水深变化在5-8m之间，为全面掌握桥址区的地质条件，项目组采用了水上高密度电阻率法开展勘察工作。勘察方案系统设计了3条纵向测线和5条横向测线的布设方案，电极间距统一采用5m，测线总长度达到约2000m。这种网状的测线布设方案能够有效保证勘察区域的覆盖完整

性，为后续的三维地质模型构建提供了充分的数据支持。同时，考虑到现场水文条件和勘察精度要求，测线的布设既确保了勘察效率，又保证了探测结果的准确性。

### (二) 勘察方案

该工程勘察采用了科学合理的勘察方案，在仪器设备选择方面使用WGMD-9多功能数字测量系统，该系统具有抗干扰能力强、数据采集精度高等特点。在测线布置上，采用主次结合的方式，主测线沿桥位线方向布置，以获取桥址区的主要地质信息，同时布置垂直于主测线的控制测线，以掌握横向地质变化。施工采用温纳四极装置，该装置信号稳定性好，分辨率高，且采用船载施工方式提高了工作效率。为确保数据质量，采用24小时连续作业模式，采样间隔设定为20ms，保证了数据的连续性和可靠性。

### (三) 成果分析

通过水上高密度电阻率法勘察，该工程获得了丰富的地质信息成果。在河床地层结构方面，清晰识别出了三个主要地层，从上到下分别为厚度2-3m的淤泥层、厚度8-12m的砂卵石层和中风化片麻岩。基岩面埋深总体在15-20m之间，但存在明显起伏，局部区域出现陡坎地貌特征。在河道中部发现了带状分布的软土层，厚度为3-5m，这一发现对工程设计具有重要指导意义。此外，勘察还发现了两处低电阻率异常区域，经综合分析判断为破碎带，这对工程安全具有重要警示作用。

### (四) 验证分析

为验证水上高密度电阻率法的勘察效果，项目组通过钻探手段进行了实地验证，结果表明该方法勘察成果与实际地质情况的吻合度超过85%，充分证明了这种勘察方法的可靠性。在探测精度方面，对地层界面的识别误差控制在0.5m以内，满足工程设计要求。有效探测深度达到25m，远超常规方法，为深部地质条件评价提供了可靠依据。与传统钻探方法相比，该方法的工作效率提高了3倍以上，大大缩短了勘察周期，降低了勘察成本，展现出显著的技术经济优势。

## 四、优势与局限性分析

### (一) 主要优势

水上高密度电阻率法在河道地质勘察中展现出多方面的优势，使其成为一种理想的勘察手段。在探测精度方面，该方法采用多电极阵列观测系统，通过高密度的测点布设和先进的数据处理技术，能够获得高分辨率的地下电性结构图像，为工程设计提供翔实可靠的地质信息。在施工效率方面，水上作业具有显著的机动性优势，测线布设灵活便捷，不受地形条件限制，能够快速完成大面积区域的勘察工作。在经济性方面，与传统钻探等方法相比，该方法投入成本相对较低，且作业效率高，可以在较短时间内完成勘察任务，具有明显的经济效益。在环境保护方面，作为一种无损检测技术，不会对地质环境造成破坏，特别适合在环境敏感区域开展勘

察工作。在信息获取方面，能够提供连续的地质剖面信息，不仅可以清晰识别地层界面，还能探测异常体，为全面评价场地地质条件提供重要依据。此外，该方法还具有探测深度大、抗干扰能力强等优点，通过改变电极间距可以灵活调节探测深度，采用数字化采集和信号处理技术有效抑制各类干扰，确保勘察成果的可靠性。

### (二) 局限性

尽管水上高密度电阻率法具有诸多优势，但在实际应用中存在一些局限性需要充分认识。首先，水深对勘察效果有显著影响，当水深过大时，电流在水体中的衰减会降低信号质量，影响探测精度。其次，随着探测深度的增加，方法的分辨率会逐渐降低，这是由于电磁场衰减的客观规律所决定的，因此深部地质体的探测精度相对较低。再次，电阻率法的地质解释具有多解性特征，相同的电阻率异常可能对应不同的地质现象，这就需要结合钻探等其他勘察手段进行验证和校核，以确保解释结果的准确性。最后，该方法容易受到外界电磁干扰的影响，如高压线、通信设备等产生的电磁噪声可能影响测量数据的质量。这就要求在勘察过程中充分考虑周边环境因素，采取必要的屏蔽和滤波措施。同时，在数据解释过程中，需要结合地质背景和工程经验，通过多种手段综合分析，才能得到可靠的勘察成果<sup>[4]</sup>。

## 五、应用建议

### (一) 技术建议

在水上高密度电阻率法的实际应用中，需要重点关注几个关键的技术问题以确保勘察质量。首先，电极间距的选择直接影响探测深度和分辨率，需要根据工程需求和现场条件进行优化。一般情况下，较小的电极间距可以获得较高的浅层分辨率，但探测深度受限；较大的电极间距虽然可以增加探测深度，但分辨率会相应降低。因此，应当根据勘察目标、水深条件和地质特征，合理确定电极间距参数，在探测深度和分辨率之间找到最佳平衡点。其次，信号质量控制是保证勘察成果可靠性的关键，需要采取多项措施加强质量控制。包括选择

合适的供电电流强度，优化采样参数设置，采用数字滤波等手段消除干扰信号，同时做好仪器设备的定期检验和校准工作。最后，水上高密度电阻率法作为一种地球物理勘察手段，应当注意与钻探、物探等其他勘察方法相结合，通过多种手段的交叉验证，提高成果的可靠性。建议在关键部位布设验证性钻孔，通过地质编录和室内试验，对电阻率法的解释结果进行验证和校核，从而提高勘察成果的准确性。

### (二) 工程建议

在工程应用方面，需要重点关注测线方案设计、施工安全和数据质量控制等关键环节。测线方案设计应当以工程需求为导向，充分考虑桥址区地质条件和水文特征，确保测线布设能够有效覆盖关键工程部位。主测线宜沿桥位线方向布设，并根据需要增加横向控制测线，形成完整的测网系统。对于地质条件复杂或重要结构物区域，可适当加密测点，提高探测精度。施工安全是水上作业必须高度重视的问题，应当根据现场水文条件，配备必要的安全设施和防护装备，制定详细的安全施工方案，包括选择合适的施工船只，配备足够的救生设备，安排专人负责安全监护，同时要特别注意恶劣天气的防范。此外，数据质量控制贯穿整个勘察过程，需要建立完善的质量保证体系。从数据采集、处理到成果解释的每个环节都要严格执行质量控制要求，包括采用标准化的作业流程，实施全过程质量监控，及时发现和处理异常数据，确保最终勘察成果的可靠性。还要建议设立专门的质量检查小组，负责数据采集过程的现场监督和成果资料的审核把关，通过多重校验确保勘察成果满足工程设计要求。

### 结束语

综上所述，水上高密度电阻率法是一种先进的工程地质勘察方法，在公路工程勘察中具有显著优势。通过实践证明，该方法能够有效探测水下地质构造，为工程设计和施工提供重要依据。但也需要注意其局限性，合理应用并与其他勘察手段结合，才能发挥最大效益。随着技术的不断进步，水上高密度电阻率法将在公路工程勘察中发挥越来越重要的作用。

### 参考文献

[1] 吴阿娜, 刘丹青, 汤琳. 基于感应电磁法和高密度电阻率法探测的区域土壤物性参数与重金属含量之间的相关性[J]. 中国环境监测, 2024, 40(06): 204-213.

[2] 姚志. 高密度电阻率成像法渗漏检测效果分析[J]. 建筑科技, 2024, 8(10): 53-56+65.

[3] 刘文辉, 赵贵章, 陈世仲, 郭鹏哲, 郭一博. 基于高密度电阻率法的河床结构特征研究: 以宿州新汴河为例[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(05): 59-65.

[4] 王杰. 三维高密度电阻率法观测系统研究与评价[D]. 导师: 张晓培; 翟松涛. 吉林大学, 2018.

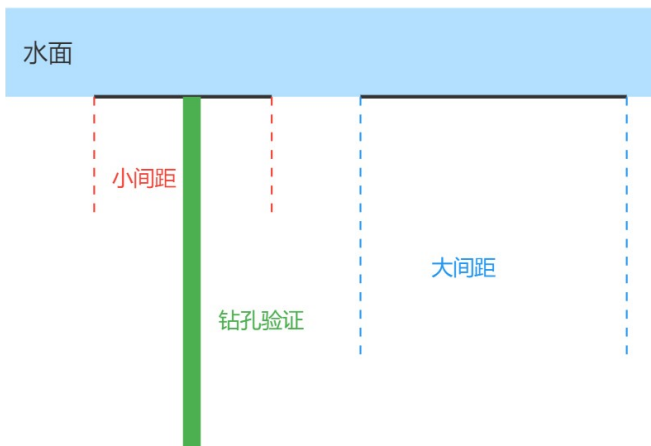


图 2 电阻率法技术应用示意图