

文章编号: 1007-2993(2023)01-0024-05

# 城市地下障碍物精确定位 综合探测方法应用研究

吴丰收 崔 然

(中船勘察设计研究院有限公司, 上海 200063)

**【摘要】** 城市变迁过程中在地下遗留了大量障碍物, 如建构筑物基础、混凝土管道等, 为城市现代化建设带来了新挑战。根据城市空间结构独特、干扰源丰富等特征, 分析地质雷达、高密度电法、地震映像等物探技术方法在城市地下障碍物探测中的优缺点。通过采用多种物探手段同触探与槽探相结合的综合探测方法, 分别对规则和不规则障碍物进行精确定位和定界, 为施工设计提供基础保障, 解决工程问题。

**【关键词】** 障碍物; 综合物探; 综合探测方法; 精确定位

**【中图分类号】** P 631

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.01.005

## Application of Accurate Location and Comprehensive Detection of Urban Subsurface Obstacles

Wu Fengshou Cui Ran

(China Shipbuilding Industry of Engineering Investigation & Design Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**【Abstract】** In the process of urban development, a large number of obstacles have been left underground, such as building structure foundation and concrete pipeline, which has brought new challenges to urban modernization. According to the characteristics of unique urban spatial structure and rich interference sources, the advantages and disadvantages of geophysical exploration techniques in the detection of urban underground obstacles were analyzed, such as geological radar, high-density electrical method and seismic imaging. By using a variety of geophysical methods combined with penetration and trenching, the regular and irregular obstacles were located and delimited accurately, which provided a basic guarantee for construction design and effectively solves the problems encountered in the project.

**【Key words】** obstacles; integrated geophysics; comprehensive detection; accurate positioning

### 0 引言

由于城市的快速发展与变迁, 在地下遗留了大量障碍物, 如地下建筑物基础、人防工程等, 其种类繁多、形式多样、埋深各异, 为城市现代化建设带来很大的影响。地下障碍物影响项目设计方案的选择和优化, 甚至产生决定性影响。特别是在施工阶段, 对施工方法选择、机械配备、安全施工等造成较大阻碍。常见问题如因障碍物造成的机械损坏、施工作业失败、地下水土流失以及地层不均匀沉降等。进而造成周边建筑物开裂、倾斜, 路面开裂、塌陷等衍生事故, 导致生命财产损失严重, 社会影响恶劣。因此, 在城市现代化建设中, 地下障碍物的探测工作逐

渐被重视起来。

国内外物探工作者一直致力于城市地下障碍物探测理论与应用研究。刘 伍等采用有限差分法对城市地下桩基、管道等典型障碍物模型进行数值模拟理论研究<sup>[1]</sup>; 徐 良等采用了地质雷达、高密度等综合物探方法对轨道交通工程施工中遇到的桥梁基础进行定位探测应用研究<sup>[2]</sup>; 赵沛沛等展开无人机低空摄影提取障碍物的方法研究, 有效提高障碍物提取效率和精度<sup>[3]</sup>; 葛双成等采用地质雷达和瑞雷波法有效探测顶管工程中抛石层的分布范围及深度<sup>[4]</sup>; 杨良权等采用地震映像法对特定工程中遇到的垃圾分布情况进行探测, 结合钻孔验证探明垃圾空间分布及产

**作者简介:** 吴丰收, 1978 年生, 男, 汉族, 江苏徐州人, 博士, 研究员, 主要从事近地表地球物理探测与评价的研究。E-mail: 40145692@qq.com

状<sup>[5]</sup>;蔡伟涛、肖 顺等采用地震映像法对城市地下大直径管道进行探测研究<sup>[6-7]</sup>,积累了丰富技术和经验。随着城市建设高质量、高效率的需求越来越迫切,对障碍物的探测准确率、精度也提出了更高要求。基于此,本文对地质雷达法、高密度电法、地震映像法等理论进行综合分析,采用综合物探方法结合触探和槽探的综合探测方法对规则障碍物和不规则障碍物进行探测,对障碍物精确定位和定量探测进行研究。

## 1 测区工程地质概况

某施工项目,面积约 81626.80 m<sup>2</sup>,场地已完成动拆迁,平整完毕,杂草丛生,地表混凝土碎块、碎砖等建筑垃圾遍布。从早期地形图获知,测区内原有地形高差变化大,有两排东西走向的多层砖混结构民房,排房间有水泥道路,基础与路面信息不详,道路右侧有一条东西走向的河流。经调查了解,地块长期闲置,河流及周边低洼带已被外来建筑垃圾和生活垃圾填

平,建筑垃圾和生活垃圾分布范围和界限不明。拟建工程桩基采用预制钢筋混凝土管桩,长约 37 m,为了保证沉桩顺利,以及确定基坑出土的处理方案,须探明区域内原房屋基础、建筑垃圾的分布范围、埋深及体量。

此外,项目地块西侧紧邻养老院交界处地下存在原水管,横断面为 3.75 m × 3.25 m 双管并排铺设,埋深、走向不详。原水管距离地块较近,施工可能引起土体扰动,造成周边地层不均匀沉降,甚至破坏原水管基础,使原水管局部内应力集中而破裂,诱发涌水、流泥等次生灾害。为了保证地块施工期间原水管不受影响,还需精确探测原水管道位置、走向及边界。

测区内地层主要为素填土、黏土、砂土、混凝土、碎砖等介质,需要探测的房屋基础、建筑垃圾以及原水管与周围介质存在较大的物性差异,为物探探测奠定了基础。该区介质的主要物性特征见表 1<sup>[8-10]</sup>。

表 1 各类介质物性参数

介质	$V_p/(m \cdot s^{-1})$	$V_s/(m \cdot s^{-1})$	$V_R/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(10^3 kg \cdot m^{-3})$	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	$\epsilon$
素填土	500	125	115	1.8	$5 \times 10^{-2}$	16
黏土	1200 ~ 1800	600 ~ 1000	550 ~ 920	1.5 ~ 2.2	$1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-3}$	2 ~ 40
砂土	600 ~ 1500	350 ~ 870	320 ~ 800	1.4 ~ 1.7	$2.7 \times 10^{-4}$	2 ~ 5
混凝土	2000 ~ 4500	1100 ~ 2700	1000 ~ 2500	2.2 ~ 2.5	$1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$	4 ~ 20
水	1430 ~ 1500			1.00	$1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	78 ~ 81
空气	310 ~ 360			0.001293	0	1 ~ 1.2

## 2 城市障碍物探测方法研究

城市工程物探方法主要包括地震波法、电磁波法、瞬变电磁法、电法等。本文针对探测目标体及场地特征,选择高密度电法、地震映像法和地质雷达法相结合的综合物探方法对地下障碍物进行探测。

### 2.1 探测方法原理

#### 2.1.1 高密度电法

高密度电法作为直流电阻率方法一种,兼有电剖面法和电测深法的探测方法。作为主动源电法,其通过 AB 电极向地下发射电流,利用 MN 电极测量电压差,利用电流和电压计算不同层深测点视电阻率<sup>[11-12]</sup>。

通过视电阻率数据反演,获取地下一定范围地层电阻率图像,从而达到对地下电阻率差异目标体的探测。

#### 2.1.2 地震映像法

地震映像法(又称高密度地震映像)是通过人工激发震源向地下传播地震波,地震波在传播过程中遇到弹性特征参数明显差异界面发生反射,通过固定偏

移距逐步移动的检波器进行地震信号接收,通过对测到的面波、直达波、反射波等多种弹性波的波形、振幅、同相轴及频率的变化进行分析,获得地下存在的异常体分布情况<sup>[13-14]</sup>。

#### 2.1.3 地质雷达法

地质雷达法(又称探地雷达法)是利用电磁波法对地下目标体无损探测的方法。在地表通过雷达天线向地下发射高束、高频、宽带电磁波,电磁波在地下介质传播,遇到电性差异界面发生反射,一部分电磁波被反射回地面,另一部分电磁波继续向下传播相继发生反射透射,反射回来的电磁波信号被地表接收天线接收,通过有效的数据处理,获得反射波的相位、时延、形状及频谱等特征参数,从而达到对地下目标体深度、性质、结构等的探测<sup>[15-16]</sup>。

### 2.2 物探方法特点分析

由于障碍物埋藏于地下,地层变动受人文活动影响大,有效资料少,造成障碍物埋深、规格、材质等信息不足,特别是受到城市空间环境影响,探测环境

恶劣、干扰源丰富,对物探方法的选择存在一定限制,需对物探方法进行全面分析,有针对性地选择高效探

测方法。本文选择的探测方法及其优缺点分析如表2<sup>[15,17-18]</sup>。

表2 物探方法分析

物探方法	优点	缺点
地质雷达法	探测效率高、灵活方便、成本低、分辨率高、抗干扰能力强、无损探测	探测深度浅、数据分析与解译难度大、探测精度和深度成反比
高密度电法	探测深度大、成果直观、信息丰富	适用硬化地表差、抗电磁干扰差、测试空间要求较大、数据处理复杂、探测精度低、成果分析专业性强
地震映像法	工作效率高、灵活、利于小空间探测、数据处理简单、成果直观	深度定位误差大、抗振动干扰能力差、异常体性质无法确定、成果分析专业性强

### 3 障碍物探测

#### 3.1 规则障碍物精确定位的综合方法探测

原水管位于地块与养老院交界处,地表分布绿化灌木、健身区、亭阁、廊道和硬化塑胶道路,测区空间小,环境复杂,作业难度大。根据现场测试条件、方法试验,综合分析采用高密度电法、地震映像法和触探相结合的综合探测方法对原水管进行精确定位探测。布设了高密度测线1和2,地震映像测线3和4,测线具体位置见图1。

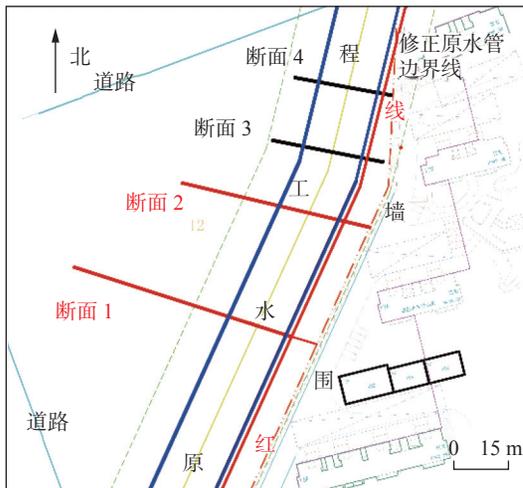


图1 原水管探测测线布置图

图2为测线1成果图,电极距0.5m。从图可知,剖面左侧电阻率相对较小,低于 $13\ \Omega\cdot\text{m}$ ,分布规律,无明显异常,表明该区域地层相对均匀,含水率高。剖面26~42m范围内浅层出现高阻区,判断为堆积的建筑垃圾。剖面42~46.5m处出现一贯通上下的闭合高阻区,分析认为高阻异常为原水管。

图3为测线3地震映像成果图,检波器100Hz,偏移距0.5m,点距0.25m,震源采用锤击震源。从图可知,6~12m范围内,深50m附近存在一组振幅均匀、相位连续的反射界面,判定为原水管的反射界面。在4~6m、12~14m附近波形错乱,相位不连

续,且呈反射弧状,分析认为是原水管与周围介质介电常数不同引起的地震波绕射、散射,其位置、走向、范围见图1中的蓝色轮廓线。

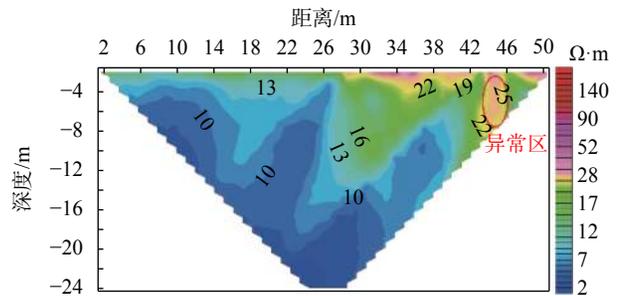


图2 高密度电法测线1剖面图

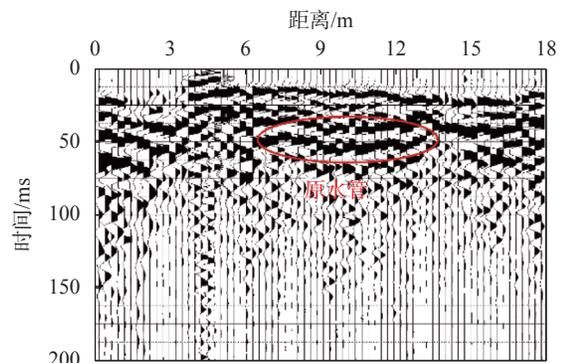


图3 地震映像法测线3剖面图

通过高密度电法和地震映像法相结合的综合方法,有效获得原水管位置和走向,但不能获得原水管的精确界面位置。而且探测成果表明原水管在中部呈斜交状,在北侧更接近施工地块,更需进一步确定原水管精确界面。本文采用触探法在综合物探成果的基础上进行精确定位,触探断面与4条测线重合,探孔布置位置根据物探成果布置,触探过程中根据探杆回弹强度、声音、进尺及趋势对原水管边界进行精确判定,以及对物探成果进行修正,最终综合确定原水管精确边界。图1中靠近原水管蓝色边界线的红色轮廓线为综合探测方法综合判定的靠近施工项目的原水管修正边界线。

3.2 不规则障碍物定量的综合方法探测

项目地块内遗留大量民房基础、房屋拆迁建筑垃圾及外来建筑垃圾,分布范围不详,但场区平整,借助地质雷达法抗干扰强、探测快速、经济的优势,先对测区网格化布设测线进行全面快速探测,排摸浅层障碍物分布情况,再结合早期地形图有针对性布设高密度测线,从而实现全区高效、精确探测。图4为测区内100 MHz天线地质雷达连测剖面图,反射波混乱,相位错乱,异常明显,分析为建筑垃圾引起,但由于地层水位浅、含水率高,电磁波衰减快,有效探测深度为2 m左右。通过雷达测线剖面的全面分析,圈定地块南北两个区域建筑垃圾分布密集,但对深层的房屋基础和建筑垃圾分布情况不明,需要借助高密度电法进一步精确探测。

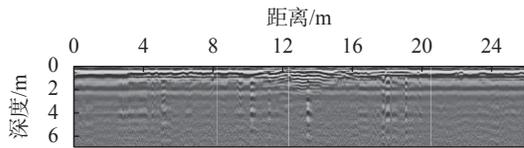


图4 地质雷达测试典型成果图

高密度电法采用温纳装置,电极距0.5 m。根据雷达成果图重点布设了15条测线,见图5。全面展示了该测区电阻率分布情况,可准确圈定房屋基础和建筑垃圾集中范围。

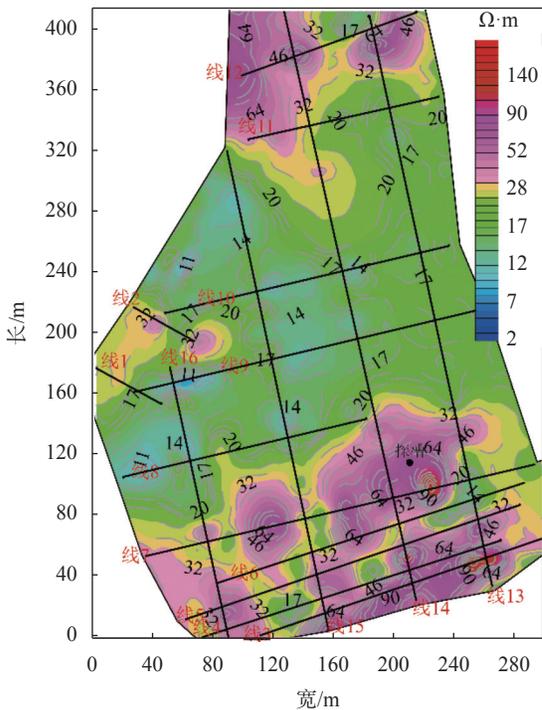


图5 测区高密度电阻率法平面图

图6为测线3完整剖面图,分析可知,0~60 m范围内,电阻率从上到下逐渐降低,判断地层相对均匀,主要为杂填土。60~196 m范围内,浅表层电阻率较高,达32 Ω·m以上,区域集中,在160 m附近存在电阻率90 Ω·m以上的闭合区,高阻区深达10 m,判断该区域房屋基础和建筑垃圾分布集中。图7为深度2.25 m、4.5 m和9.0 m的电阻率三维成果图,从图可知,高阻区随着深度的增加范围逐渐缩小,低阻区逐渐增大,根据高阻区随深度的范围变化,可圈定出房屋基础和建筑垃圾的三维立体图,获得障碍物的分布及体积变化情况,有效计算出障碍物体量。

图6为测线3完整剖面图,分析可知,0~60 m范围内,电阻率从上到下逐渐降低,判断地层相对均匀,主要为杂填土。60~196 m范围内,浅表层电阻率较高,达32 Ω·m以上,区域集中,在160 m附近存在电阻率90 Ω·m以上的闭合区,高阻区深达10 m,判断该区域房屋基础和建筑垃圾分布集中。图7为深度2.25 m、4.5 m和9.0 m的电阻率三维成果图,从图可知,高阻区随着深度的增加范围逐渐缩小,低阻区逐渐增大,根据高阻区随深度的范围变化,可圈定出房屋基础和建筑垃圾的三维立体图,获得障碍物的分布及体积变化情况,有效计算出障碍物体量。

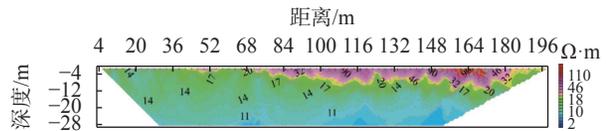


图6 高密度电法测线3剖面图

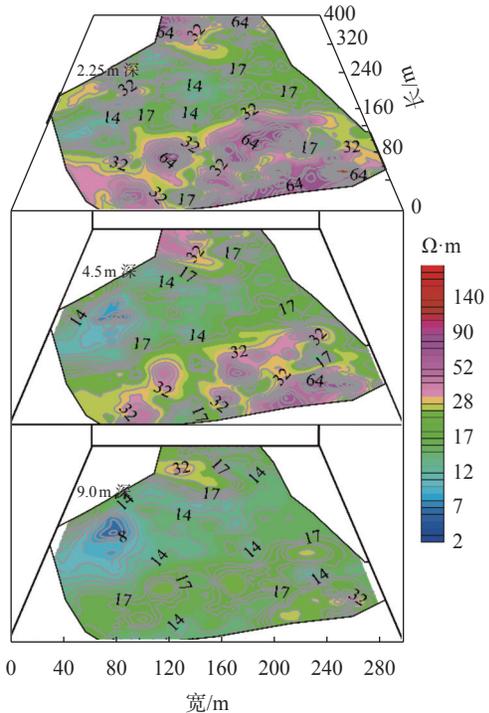


图7 高密度电阻率三维成果图

为了验证高阻区物性,准确校正异常范围,采用探槽法,位置见图5。探槽长3 m,宽2 m。经验证,0.0~1.0 m范围内为细碎砖混结构的建筑垃圾和杂填土。1.0~2.0 m范围主要由砖块、混凝土碎渣及少量杂填土组成,且随着深度增加,大块建筑垃圾增多。2.0~3.7 m范围内主要为房屋墙体和基础,墙体和基础相连接,墙体为青(红)砖混凝土结构,基础为块石混凝土砌体或条形块石。3.7 m以下为碎石土层和淤泥土层。探槽揭露的障碍物深度变化与高密度成果吻合,并进一步校正了障碍物深度。

3.3 小结

通过综合物探方法之间的相互验证,最终确定

了规则障碍物的准确位置和范围、不规则障碍物的分布范围和埋深。该结果为项目施工提供了详实的参考依据。

#### 4 结论

本文系统分析了常用工程物探方法技术理论及优缺点,为城市障碍物探测应用提供参考。同时,通过工程实例的综合探测方法应用,对规则障碍物、不规则障碍物进行精确定位和定量探测,为工程设计、施工及障碍物处理提供技术支撑。通过应用证明:

(1)城市空间结构的独特性,对物探方法抗干扰能力、测试灵活性要求更高,单一探测方法很难达到探测目的,需综合物探方法优势互补,相互验证,提高探测准确率。

(2)障碍物探测,需收集测区原始资料,详细探查范围内地下管线排布情况,充分掌握现状,排除干扰,确保探测方法选择得当以及测试成果的有效性。

(3)综合物探方法能有效提高准确率,但要实现成果异常物性参数的解析和精确定位,触探、验槽等直接方法的应用是非常必要的。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘伍,曾来,司永峰,等. 地下障碍物测井中地震散射波成像数值模拟[J]. 上海国土资源, 2012, 33(3): 66-70.
- [2] 徐良,张洋,李伟,等. 轨道交通典型障碍物物探定位研究[J]. 城市勘测, 2016, (4): 168-171.
- [3] 赵沛沛,王艳梅,彭丽,等. 物探工区障碍物信息的提取及应用[J]. 物探装备, 2017, 27(5): 345-350.
- [4] 葛双成,方均舰,汪守龙,等. 物探技术在顶管工程障碍物探查中的应用[J]. 工程勘察, 2009, (2): 494-496.
- [5] 杨良权,李波,魏定勇,等. 地震映像法在垃圾坑勘察中的应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1788-1794.
- [6] 蔡伟涛. 地震映像法不同偏移距在地下大管径管线探测中的应用[J]. 科技风, 2019, (9): 138,147.
- [7] 肖顺,张永命,任建平. 地震映像法在超深管线探测中的应用[J]. 城市勘测, 2014, (1): 170-172.
- [8] 朱能发,丁素兰,孙士辉. 高密度地震映像的道路沉陷探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2): 248-250.
- [9] 沙椿. 工程物探手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [10] 化建新,郑建国. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] 周越,曾昭发,唐海燕,等. 公路勘察中滑坡体的地球物理特征与分析——以张榆线公路勘察为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 638-644.
- [12] 杨力. 高密度电法和地震映像法在岩溶勘察中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [13] 李明,雷宛,陈宁,等. 多偏移距地震映像法与瞬态瑞雷波法在隧道岩溶探测中的中和应用[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(5): 663-668.
- [14] 王兆宁. 地震映像法在铁路隧道隧底岩溶探测中的应用[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 80-82.
- [15] 吴丰收. 混凝土探测中探地雷达方法技术应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [16] 薛海阳,袁建议,高皋,等. 地质雷达在城市道路病害探测中的应用[J]. 湖北理工学院学报, 2017, 33(5): 40-46.
- [17] 李树荣. 天然源面波法及地震映像法在勘察中的应用[J]. 施工技术, 2019, 46(5): 46-47.
- [18] 杨放丹. 地震映像法在溶洞探测中的应用[J]. 西部探矿工程, 2018, (1): 120-122.

收稿日期: 2021-08-25