

文章编号: 1001-1749(2023)05-0604-15

# 基于 GEM-2 多频电磁技术与并行高密度电法的 减量化土地复垦快速检测探讨

周俊峰<sup>1</sup>, 杨超<sup>1</sup>, 刘小松<sup>2</sup>

(1. 上海元易勘测设计有限公司, 上海 201203;

2. 上海市浦东新区规划和自然资源管理局, 上海 200120)

**摘要:** 上海是全国第一个在省级层面提出在全市域范围内实施减量化的城市, 减量化后的土地是否存在建筑垃圾, 其分布、含量是土地是否复垦的重要依据。这里综合多频电磁法(GEM-2)及并行高密度电法(PEM)对上海某减量化土地进行了快速探查工作。为进一步提高检测效率, 以多频电磁法(GEM-2)作为面积性快速扫描手段, 以并行高密度电法(PEM)作为剖面测深控制, 3个频率的 GEM-2 数据所反应的不同深度的电导性平面特征, 与 PEM 所反应的电阻性具有很好的对应性。研究表明, 高电导率区域对应于钢筋污水池等钢筋混凝土构筑物的位置, 低电导率与高电阻对应于砖块、混凝土块、水泥地坪等位置。通过利用高密度电法对 GEM 的刻画对比, 以及现场开挖验证, 结合文献调研, 总结了地区相对经验性的深度校正公式, 较好地解决了地下建筑垃圾埋深问题; 在新的类似实践工作中, 可完全利用 GEM 替代高密度电法, 实现快速检测的目的。

**关键词:** 减量化; 建筑垃圾; 多频电磁法; 并行高密度电法; 快速扫描

**中图分类号:** P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.07

## 0 引言

上海市在 2014 年拉开了全市集建区外建设用地减量化的序幕<sup>[1]</sup>, 重点对建设水平较低的建设用地做减法, 主要包括两部分: ①“198”工业区域; ②农村宅基地, 两者总面积约为 998 km<sup>2</sup>。

其中有一部分是要通过土地整理和土地复垦, 将其变为生态用地和耕地<sup>[2]</sup>。如此巨大的建筑面积整理复垦后, 下一步还需对该区域进行检测验收工作。然而, 当前的垃圾检测是传统的钻孔(挖机)手段, 即根据土地的建组或使用历史挑选一些区域用钻机取土(挖机开挖), 这种手段对于大面积的土地

来说既不准确、不全面, 也不经济, 随机性很强, 上海及其他区域均存在这样的“工作瓶颈”。那么是否适于农用, 土地下面的垃圾分布及其含量是其中一个关键因素, 决定着是否作为合格农用地的一重要指标。

针对减量化后土地的检测工作, 一方面要确定残留建筑垃圾的平面位置, 另一方面要确定其深度, 同时还要快速提供检测结果。目前, 地球物理方法技术多应用于地下垃圾填埋场及其污染探测<sup>[3-7]</sup>, 减量化土地整理和复垦后的检测验收等相关工作则没有地球物理探测手段报道。

减量化整理和复垦后的土地一般存在残留建筑垃圾, 建筑垃圾由砖块、钢筋混凝土、混凝土碎块等组成, 与土壤存在明显的物性差异<sup>[8]</sup>。常用地球物

收稿日期: 2022-06-08

第一作者: 周俊峰(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程工作, E-mail: 369844484@qq.com。

通信作者: 杨超(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程物探工作, E-mail: wtyizhifeng@163.com。



图1 地块历史照片

Fig.1 Historical photos of the site

理方法因受目标体大小、装置类型、地电条件、干扰异常等因素影响较大,特别是上海地区潜水位浅,往往很难探测出有效异常<sup>[3-9]</sup>。

GEM-2 是一种便捷式手持多频电磁勘探仪器,该仪器可同时发射多种频率,对应寻找不同埋深的地下掩埋物,适用于浅层地质勘查。由于其操作简便、高效等优点,国内、外学者在多种不同的地质条件下对其进行了探索,并获得了较传统电磁勘探仪器更高精度的平面测量结果<sup>[10-12]</sup>,同时也证实 GEM-2 电磁仪器在地表地质勘查中具有十分广泛的适用范围,适用于解决多种地质问题,但国内目前很少购置和使用该仪器<sup>[5]</sup>。并行高密度电法技术 (PEM) 是一种分布式并行智能电极电位差信号采集方法,与常规传统高密度电法每次供电只能采得一个测点数据相比,网络并行高密度电法可同时获取多个测点数据,是一种全电场观测技术<sup>[13]</sup>。含 AM 法、ABM 法 2 类工作方法,一次测量,可解析出多种装置类型数据,同时采集时间呈  $n^2$  倍缩

短<sup>[14-15]</sup>,效率极高。

鉴于 GEM-2 电磁仪器的简便高效性和其平面检测结果的高精度,以及并行高密度电法全电场快速良好的垂向探测效果,笔者针对上海软土介质的地层特性,尝试以两种方法组合实现对减量化后土地的快速检测工作。

## 1 减量化地块概况

本次检测的减量化土地位于市区内,平均吴淞系统标高为 4.2 m,地块地形平坦,利于开展工作。

卫星地图显示,2003 年时地块以农田为主,南侧有少量民房分布;2008 年地块南侧民房部分已拆除,农业用地可能已经流转为建设用地;2009 年地块新增部分厂房;2010 年至 2019 年除西侧新增部分建筑外,其他基本未发生变化。截止到 2020 年 11 月 12 日,地块进行探测之时,其内原有建筑已拆除,地表建筑已清理,地面已整平(图 1)。

减量化整平后,需对该区域进行检测验收工作。对于大面积的土地来说,钻机取土(挖机开挖)既不准确、不全面,也不经济,随机性很强。因此,针对建筑残留垃圾的具体分布,有必要开展相关地球物理勘探工作。

## 2 工程地质特征及电性条件

### 2.1 工程地质特征

地块所在区域是由长江下泄的大量泥沙在江海交互作用下不断加积而形成,属第四纪全新世(Q4)滨海一河口、浅海、沼泽、溺谷相沉积层,主要由粘性土、粉性土及砂性土组成,探测深度范围内各土层主要分布特点为:第①层杂填土,主要由砖块、混凝土块、碎石等建筑垃圾夹粘性土组成,地块内遍布,局部地段厚度较大;第②层灰黄色粉质粘土,局部夹薄层粉土;第③层灰色淤泥质粉质粘土,夹薄层粉土,土质不均匀,地块内遍布,其间粉土富集段,单独划分为③夹层灰质粉土;第④层灰色淤泥质粘土,夹少量粉土,土质较均匀,地块内遍布(表1)<sup>[8]</sup>。

### 2.2 地球物理特征

根据电测井资料分析:总体上,探测区域呈低电阻特征,并在20 m范围内随着深度增加电阻率降低,且趋于“0”;浅部各个土层之间呈“高低相间”的电性特征,界面相对较清晰,至淤泥质土电阻率急剧下降,电性不再具有可区分性(图2)<sup>[8]</sup>,但土体与混凝土电阻率值差异明显<sup>[16]</sup>,含混凝土、砖块的杂填土呈现中、高电阻特征<sup>[8,17]</sup>;淤泥质粉质粘土呈低电阻特征;粘质粉土夹层呈中电阻特征(表1,图2)。因而可以利用电性特征圈定异常带,推断混凝土基础的空间位置。

## 3 方法原理及特点

### 3.1 多频电磁法(GEM-2)

电磁法探测以地下介质的电性和磁性为基础,通过发射线圈产生一个包含不同频率的一次电磁场,一次磁场在地下的良导体中感应出微弱的涡流电场,由此涡流产生一个二级磁场并与经空气传播的初级磁场叠加在一起被接收线圈检测和记录<sup>[18]</sup>(图3)。

表1 地块土介质特征及电阻率参数<sup>[8]</sup>

Tab.1 Resistivity parameter of soft soil medium

序号	层位	土层名称	深度/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	①层	杂填土	0~1.5	$\frac{11.24-32.5}{20.8}$
2	②层	粉质粘土	$\frac{1.6-5.0}{3.2}$	$\frac{12-21.9}{15.8}$
3	③层上	淤泥质粉质粘土	$\frac{3.6-5.6}{4.6}$	$\frac{3.8-7.6}{5.8}$
4	③夹层	粘质粉土	$\frac{4.6-7.5}{6.1}$	$\frac{6.1-13}{7.9}$
5	③层下	淤泥质粉质粘土	$\frac{6.3-8.8}{7.6}$	$\frac{3.8-7.6}{5.8}$
6	④层	淤泥质粘土	$\frac{8.5-10.7}{9.5}$	$\frac{1.2-1.4}{1.3}$
7	①、②、③、④层	地下水	$\frac{1.18-1.95}{1.64}$	$10^{-1}-3 \times 10^2$
8	①、②层	混凝土	/	$4 \times 10^1 - 10^3$

①电阻率:1-6为收集上海地区11口电测井资料;混凝土等建筑基础主要埋于①、②土层内;②电阻率:7-8参数节选自《工程物探技术标准》(DG/TJ08-2271-2018)附录A;③深度:钻孔实测顶深;④ $\frac{11.24(\text{最小值})-32.5(\text{最大值})}{20.8(\text{平均值})}$

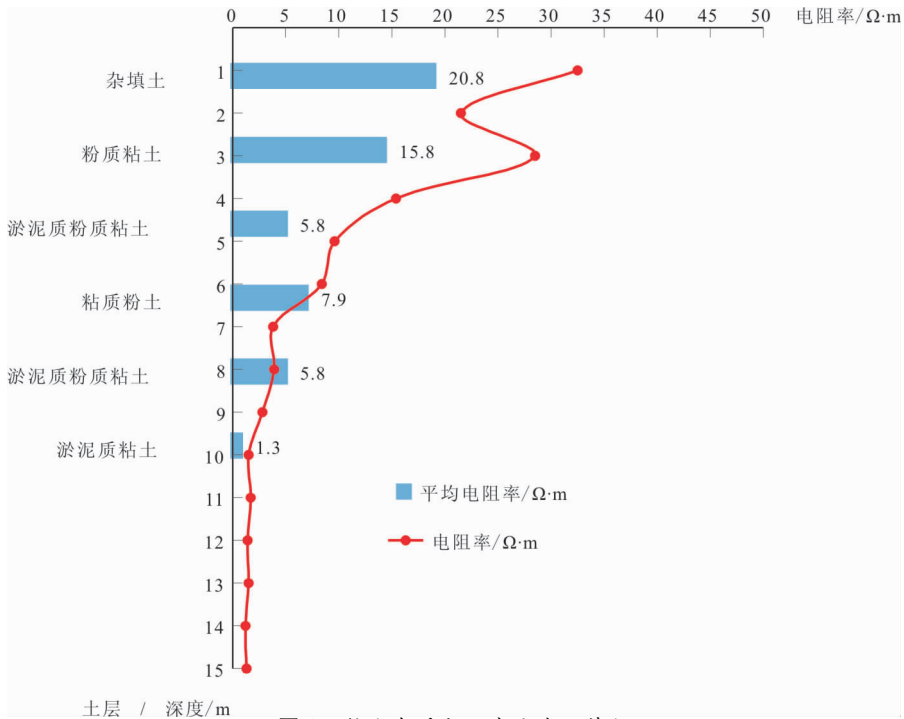


图 2 软土介质电阻率曲线及特征

Fig. 2 Resistivity curve and characteristics of soft soil medium

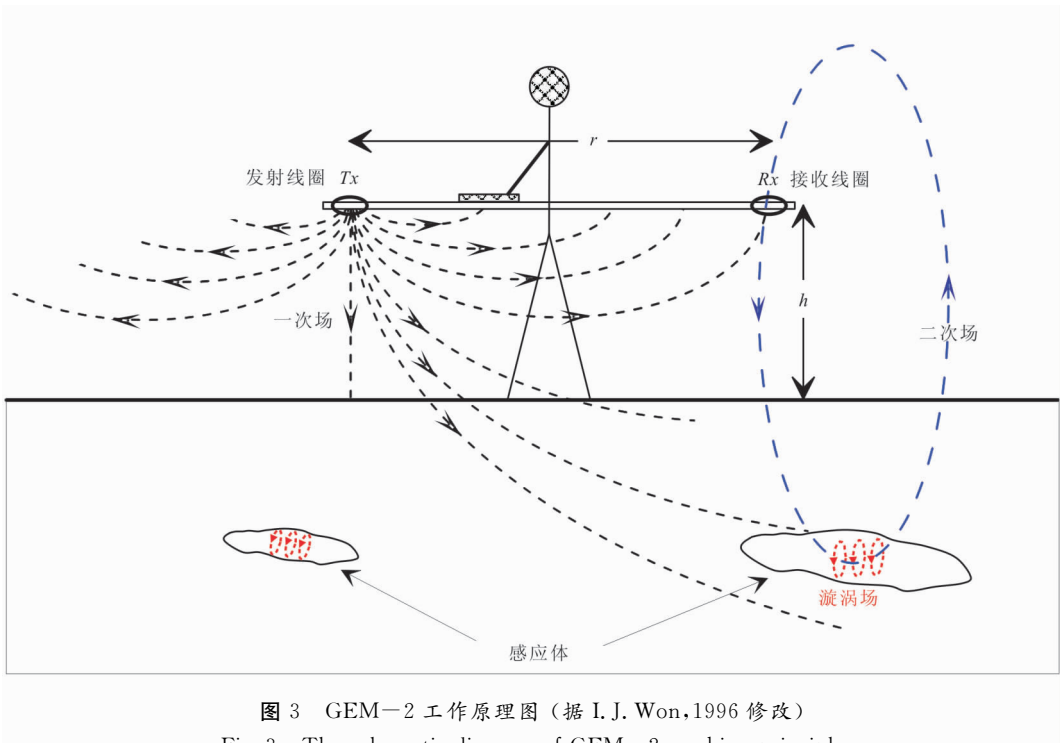


图 3 GEM-2 工作原理图 (据 I. J. Won, 1996 修改)

Fig. 3 The schematic diagram of GEM-2 working principle

GEM-2 接收线圈接收到的信号中,仅二次场信号能够反映地下介质电导率信息的,因此该系统利用补偿线圈分离出一次场和二次场。另外考虑到一次场比二次场信号强得多,同时将二次场和一次场做比值,并乘以  $10^6$ ,称为归一化二次场,用百万

分之一(ppm)度量<sup>[18]</sup>。

对于水平共面模式(或垂直偶极子模式),地面以上  $h$  高度观测,归一化二次场可以写成<sup>[10,18]</sup>:

$$\frac{H_S}{H_P} = -r^3 \int_0^{\infty} R(\lambda, \mu, \sigma, \omega) e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda =$$

$$I + iQ \quad (1)$$

$$R(\lambda, \mu, \sigma, \omega) = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + i\omega\mu\sigma}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + i\omega\mu\sigma}} \quad (2)$$

其中:  $H_s$  为二次磁场;  $H_p$  为一次磁场;  $r$  为收发线圈距离;  $h$  为仪器距地面高度;  $J_0$  为零阶贝塞尔函数;  $\lambda$  为积分变量;  $\mu$  为磁导率;  $\sigma$  为电导率;  $\omega$  为角频率;  $I$  为同相分量;  $Q$  为正交分量。GEM-2 所测原始数据就是同相分量和正交分量, 基于此, 可以获得其他不同物理意义的参数。

本次电磁法检测工作采用美国 Geophex 的 GEM-2。该仪器工作频率范围为 25 KHz~93 KHz, 最多同时采集 10 个频率, 多个频率下测量介质响应相当于从多个深度测量, 因此可以用来成像地下物体的三维分布。

### 3.2 并行高密度电法(PEM)

本次测区的测深检测工作, 采用安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司的 HZE11I 并行高密度电法仪完成。PEM 通过每个电极 1 个 ADC 及开关装置的集成, 实现全部电极的并行激与采集<sup>[14]</sup>, 供电测量过程中没有闲置电极<sup>[15]</sup> (实测 64 道测量约 3 min), 采集数据量海量提升, 而采集时间呈  $n^2$  倍缩短<sup>[14]</sup>。

1) AM 法。公共地电极  $N$  与公共供电负极  $B$  单独布设, 测线上  $n$  个电极自动轮流取得作为供电正极  $A$ 、建立单点电源场的工作资格, 每当 1 个电极取得该资格后, 测线上其余  $n-1$  个电极自动扮演采集电极  $M$  的角色。AM 法能够解析出二极法、三极法在  $n$  个电极中的所有电极距排列组合的视电阻率值(图 4(a))<sup>[14,19-20]</sup>。

2) ABM 法。公共地电极  $N$  单独布设, 测线上全部  $n$  个电极中, 循环性地由任意 2 个电极取得作为供电正极  $A$ 、负极  $B$  的资格, 其余  $n-2$  个电极则扮演采集电极  $M$  的角色。ABM 法能够解析出所有四极法在  $n$  个极中所有电极距排列组合中的视电阻率(图 4(b))<sup>[14,19-20]</sup>。

根据测量互换原理, 可以将 AM 法中正供电数据变为负供电数据, 然后根据电极空间关系将正、负供电数据组合起来, 即可取得对称四极数据<sup>[15,20]</sup>。因此, 通过网络并行高密度电法技术, 一次现场测量可实现直流电法勘探中的二极法、单极偶极、温纳三极、四极、偶极、微分和中梯等各类电法装置(图 4)。

## 4 应用效果分析

### 4.1 多频电磁法平面探测成果分析

I. J. Won<sup>[21]</sup> 通过正演模拟从理论上证明, GEM-2 所获得的异常中心位于目标体的正上方, 因此, GEM-2 异常对于目标体边界识别精度相对较高。

笔者利用 GEM-2, 采用 18 325 Hz、38 275 Hz、80 025 Hz 三个工作频率, 对三种不同深度的电导率层进行了测量。利用测量中介质电导率和电磁波频率, 根据“趋肤深度列线图”计算各层的趋肤深度  $\delta$ <sup>[22-23]</sup> (图 5), 从而获得探测深度<sup>[18,24]</sup>。

用于确定每个层深度的电导率, 是通过从 GEM-2 测量中得到电导率的平均值来计算的<sup>[22-23]</sup>。计算使用了大约 100 000 个数据点, 得到的平均值为 40 mS/m。通过使用这个值, 由各自频率表示的层的估算深度如表 2 所示。

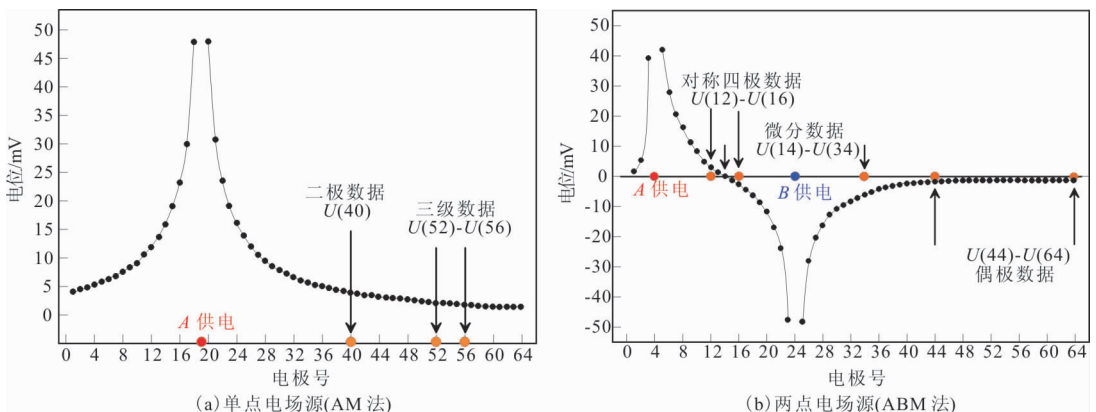


图 4 AM 和 ABM 方法中的电位分布及观测装置<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Potential distribution and observation device in AM and ABM method

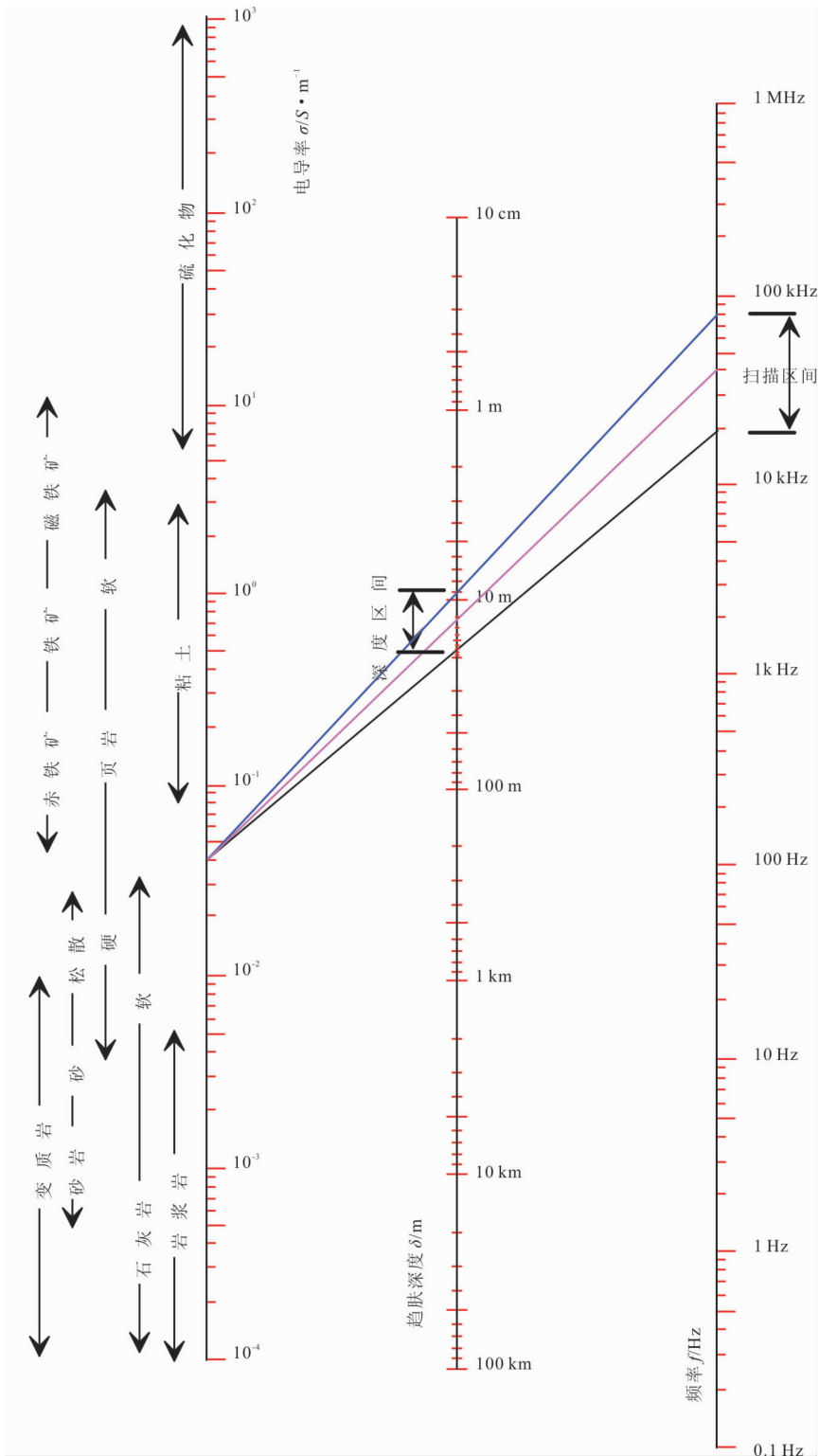


图 5 趋肤深度—电导率—频率关系图

Fig. 5 Skin depth conductivity frequency relationship diagram

地块的电导率与原建筑之间的相互关系如图 6 所示,其中电导率值是 38 275 Hz 的,据此,可以发现这一关系的 3 点现象。

1)除四周末拆除完的混凝土地坪外,地块内高

低电导率分区非常明显,原建筑区电导率呈现显著的高值,道路区则为电导率低值。

2)地块中部区域电导率值全区最低,呈片状分布。

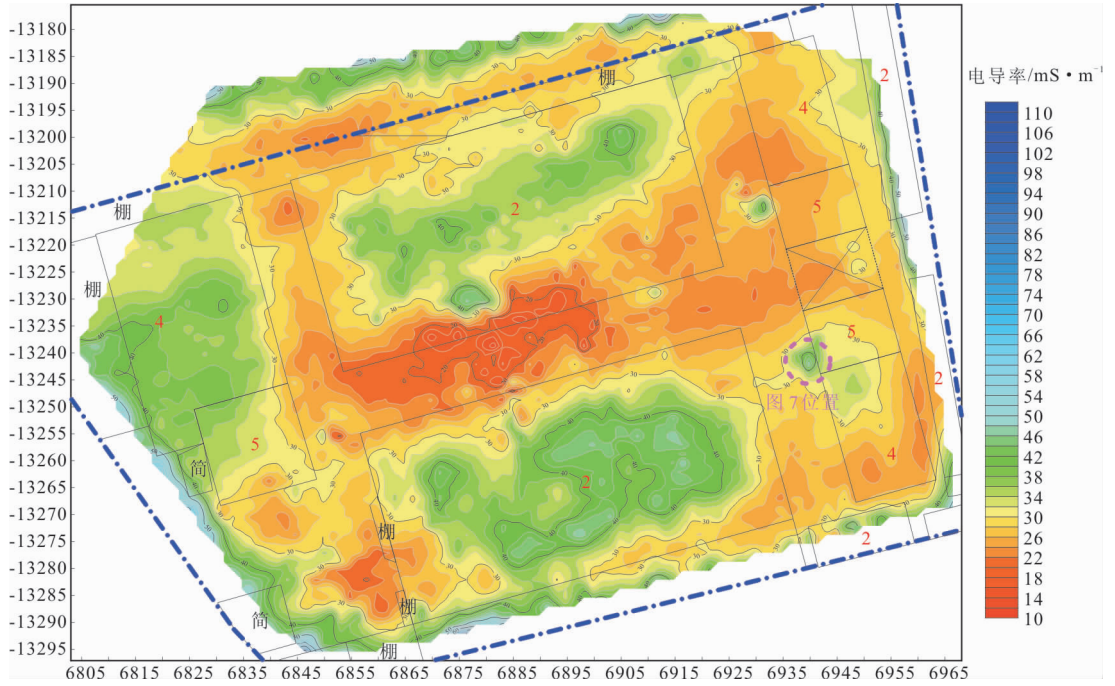


图 6 电导率分布与原建筑关系图(38 275 Hz)

Fig. 6 The conductivity distribution has a strong relationship with old buildings



图 7 高导体验证照片

Fig. 7 The verification photo of high conductor position

表 2 估算探测深度

Tab. 2 Estimating detection depth

频率/Hz	估算深度/m	校正深度/m
18 325	4.1	1.2
38 275	3.4	1.0
80 025	2.8	0.8

3) 在东侧的 4 层与 5 层建筑区,却没有显示任何明显的高导电性值。然而,GEM-2 观察到一个有趣的现象,即在它们之间对称分布了更高的电导率圈闭。

探测结束后,对现象 3) 南侧进行了验证,发现

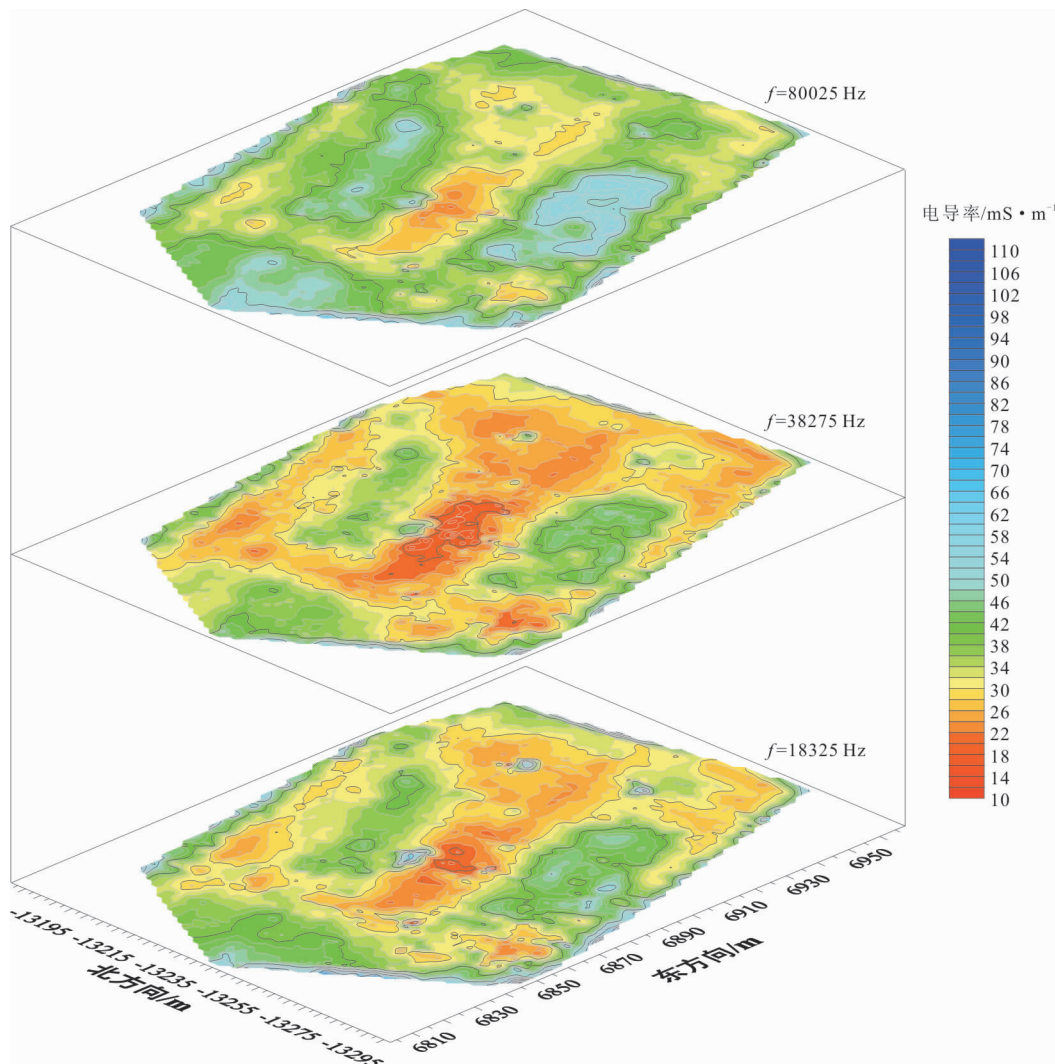


图8 不同深度电导率分布图

Fig. 8 Isoline map of conductivity at different frequencies

其为小型钢筋混凝土污水池(黑色淤泥,发臭),埋于地表以下1.0 m~1.5 m之间(图7)。至此,可以判断,根据趋肤深度估算的探测深度是偏深的,至少在低导区( $<50$  mS/m)是偏深的,需对其进行校正(表2)。

地块不同频率的电导率之间的相互关系如图8所示,据此,可以发现这一关系的3点现象。

1)从高频到低频,原建筑区电导率呈现显著的高值,道路区呈现显著的低值,除数值略有降低外,整体趋势未变。

2)从高频到低频,电导率低值区范围先变大后缩小,表明38 275 Hz的电导率值反映地块残留建筑基础的整体分布情况。

3)从高频到低频,东侧的4层与5层建筑区之间对称分布的更高的电导率圈闭逐渐变得显著,表明38 275 Hz的电导率值几乎完全反映了地块残留建筑的分布情况。

#### 4.2 并行高密度电法(PEM)剖面测深成果分析

地块的电阻率与原建筑之间的相互关系如图9所示,其中电阻率值是0.5 m深度的平面电性特征,总体上,电阻率所呈现的特征与电导率吻合。

根据软土介质中建筑基础的工程地质—地球物理解释模型<sup>[8]</sup>,对地块地下建筑残留基础空间分布进行了分析、预测。认为:①电性高阻异常成片出现的,表示混凝土地坪未清除彻底,电阻率一般大于 $60 \Omega \cdot \text{m}$ ;②电性中高阻异常,一般不规则变化,表

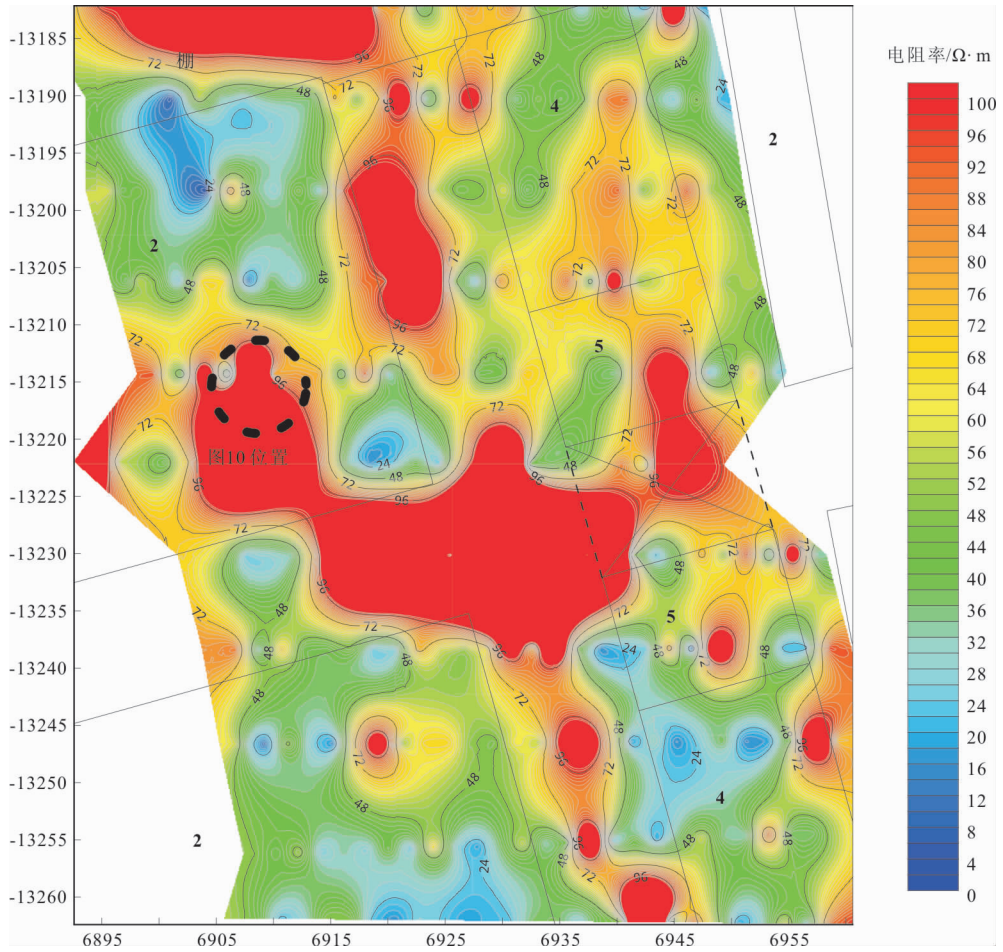


图9 电阻率分布与原建筑关系图(0.5 m)

Fig. 9 The resistivity distribution has a strong relationship with old buildings

明为夹杂砖块、混凝土块地杂填土,电阻率一般在  $25 \Omega \cdot \text{m} \sim 60 \Omega \cdot \text{m}$ ;

地块表层清理 50 cm 杂土后,图 9 西侧大面积高阻异常体出露,为水泥地坪(图 10)。至此可以判断,根据直流电法反演的探测深度基本可以反映残留建筑基础的深度。

地块不同深度的电阻率如图 11 所示,据此可以发现:①从地表到深部,电阻率高值范围逐渐缩小,至 2 m 电阻率圈闭零散分布,该深度以下逐渐转变为正常地层;②未清除彻底的建筑残留物集中分布在 1.5 m 以上;③从地表到深部,东侧的 4 层与 5 层建筑区之间对称分布的更高的电导率圈闭(图 8)在不同深度电阻率分布图中皆没有明显反映,可能由于高导体较小,高密度测点遗漏的原因。

## 5 复垦开挖与讨论

### 5.1 物探成果综合解释

分析发现:①杂填土层以混凝土块、砖块、碎石等建筑垃圾夹粘性土组成;②混凝土块、砖块、碎石块等,含水率低,电阻率较高,电导率较低,因而表层电阻率呈不规则变化,局部部分区域出现电阻率极高的现象;③钢筋混凝土构筑物,由于钢筋的感应强,局部形成电导率极高的现象;④粉质粘土层、淤泥质粘土层位于杂填土之下,含水率高,电阻率较低,在探测范围内越往底部电阻率越低。

根据以上特点,建立异常解释模型:①浅部不规则变化的中高阻异常,电阻率一般在  $25 \Omega \cdot \text{m} \sim 60 \Omega \cdot \text{m}$ ,电导率一般在  $20 \text{ mS/m} \sim 30 \text{ mS/m}$  之间,为



图10 高阻体验证照片

Fig. 10 The verification photo of high resistance body

夹杂砖块、混凝土块的杂填土;②粉质粘土、淤泥质粘土等正常土层,电阻率一般在  $15 \Omega \cdot \text{m} \sim 25 \Omega \cdot \text{m}$  以下,电导率一般在  $30 \text{ mS/m} \sim 50 \text{ mS/m}$  之间;③成片出现的电性高阻异常,电阻率一般大于  $60 \Omega \cdot \text{m}$ ,电导率一般在  $25 \text{ mS/m}$  以下,为混混凝土坪;④钢筋构筑物电导率一般在  $50 \text{ mS/m}$  以上,具有极大值及梯度带(图12)。图12上方为  $0.5 \text{ m}$  电阻率切片,  $60 \Omega \cdot \text{m}$  以上划分建筑基础;下方为  $38 \text{ 275 Hz}$  电导率切片,仅显示  $30 \text{ mS/m}$  以下建筑基础范围,及  $50 \text{ mS/m}$  以上极值圈闭的钢筋构筑物范围,黑色线条为  $60 \Omega \cdot \text{m}$  以上等值线投影位置,图中数字①~⑥为图13所示位置。

## 5.2 GEM-2 深度校正

前面已述及,I. J. Won 通过正演模拟从理论上证明 GEM-2 所获得的异常中心位于目标体的正上方<sup>[21]</sup>,因此,GEM-2 异常对于目标体边界识别精度相对较高。

对于深度而言,多数学者都沿用趋肤深度  $\delta = \sqrt{2/\sigma\mu\omega}$  进行表述,其中  $\sigma$  表示电导率, $\mu$  表示磁导率, $\omega$  表示角频率;实际工作中,有学者利用测量中

介质电导率和电磁波频率,根据“趋肤深度列线图”计算各层的趋肤深度  $\delta$ <sup>[22-23]</sup>,也有学者利用实验发现的公式  $d = \sqrt{\delta}$ <sup>[18,24]</sup>,估算探测深度。

笔者在使用过程中,利用介质电导率和电磁波频率,依据“趋肤深度列线图”<sup>[22-23]</sup> 计算趋肤深度  $\delta$ ,然后采用  $d = \sqrt{\delta}$ <sup>[18,24]</sup>,估算了 GEM 在地块内的探测深度。综合对比不同频率(深度)电导率分布图(图8)、不同深度电阻率分布图(图11)及开挖验证结果,发现其估算偏深,因此,对其进行了校正(表2),在高密度电法成果、及局部开挖验证的约束下,确认地块内 GEM 探测深度  $d = (0.3 \sim 0.5)\sqrt{\delta}$ ,结合复垦开挖,最终认为地块内 GEM 探测深度  $d = 0.3\sqrt{\delta}$  更为合适,最终校正结果列于表2。

## 5.3 复垦开挖

根据前面划分的建筑基础位置,对复垦地块进行了大范围开挖换填。开挖结果与探测一致,位置①处、③处为残留的矮砖墙,埋深  $0.8 \text{ m} \sim 1.5 \text{ m}$ ,位置②处、④处、⑤处为大面积混凝土地坪,埋深  $0.5 \text{ m} \sim 1.2 \text{ m}$ ;位置⑥处为小型钢筋构筑物污水池,埋深  $1.0 \text{ m} \sim 1.5 \text{ m}$ (图13)图中数字①~⑥与图12所

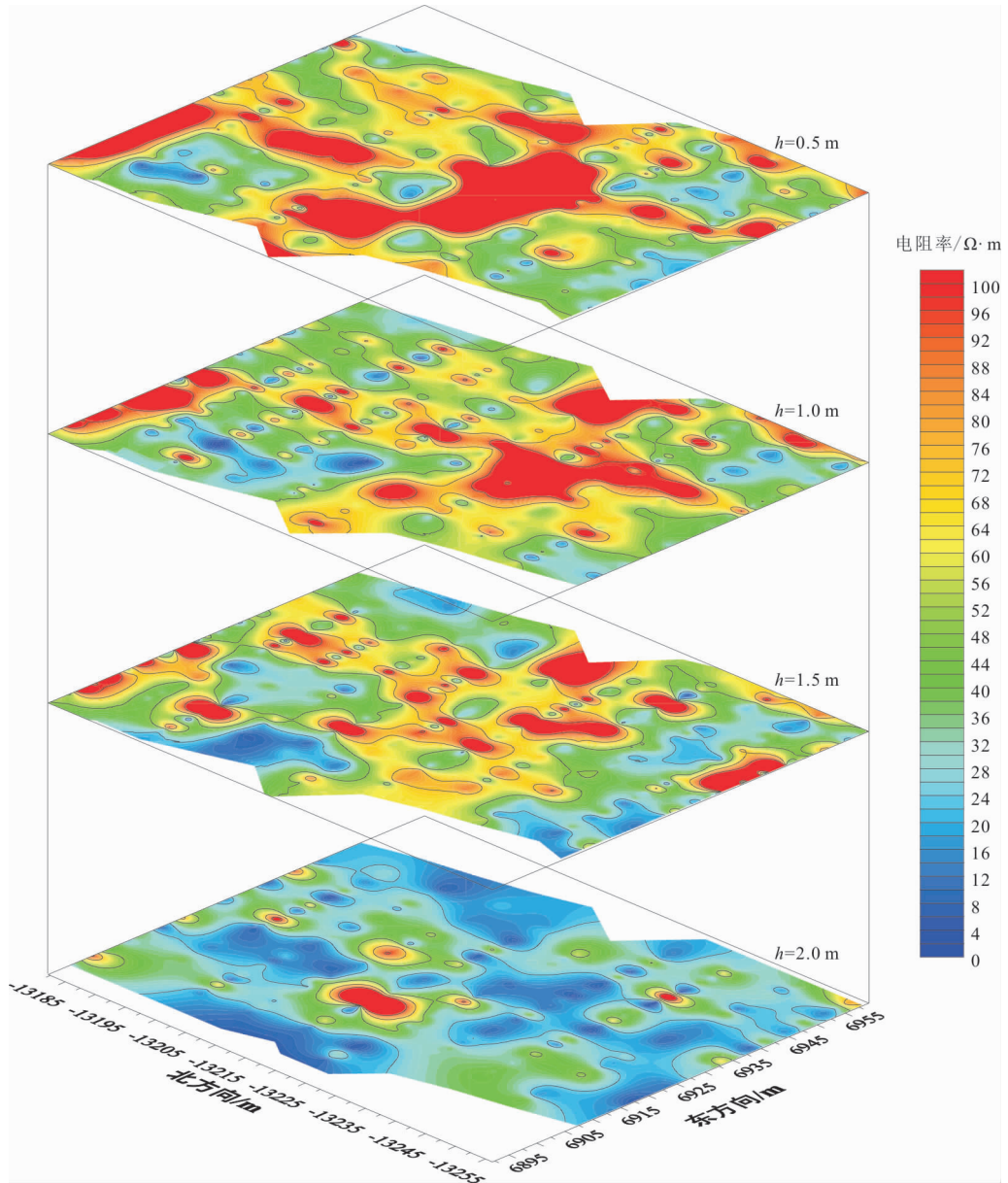


图 11 不同深度电阻率分布图

Fig. 11 Isoline map of resistivity at different depths

示位置对应;图中⑤⑥为早期局部验证照片,①~④为后期大面积复垦开挖照片。

## 6 结论

1)多频电磁法(GEM-2)可以快速高效地得到区域平面电导率特征,从而获得建筑基础的边界,特别是对钢筋混凝土等高导体具有很好地反映;在计算深度时可利用介质电导率和电磁波频率,依据“趋肤深度列线图”计算趋肤深度 $\delta$ ,然后采用 $d=\sqrt{\delta}$ ,快速

估算探测深度,但据此估算的探测深度与实际验证深度比较是偏深的,需要进行校正,校正的探测深度 $d=(0.3\sim 0.5)\sqrt{\delta}$ 。

2)并行高密度电法(PEM)对小型钢筋混凝土污水池没有很好的反映,但很好的呈现了大面积水泥地坪异常,且根据反演的探测深度与实际深度比较是基本一致的。

3)以多频电磁法(GEM-2)作为面积性快速扫描手段,以并行高密度电法(PEM)作为剖面测深控制,两者结果具有很好的一致性。高电导率区域对

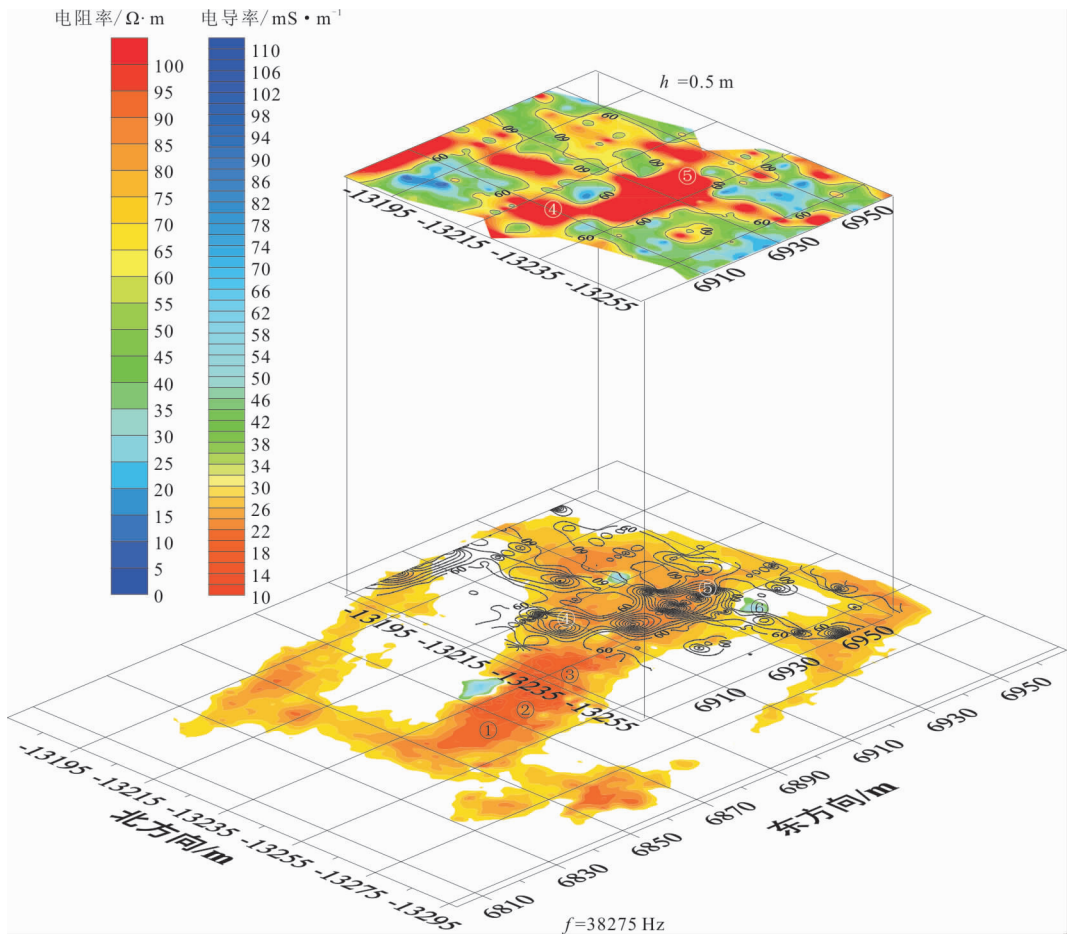


图 12 探测区地下建筑基础解释成果图

Fig. 12 Interpretation results of underground building foundation in detection area

应于钢筋污水池等构筑物的位置,低电导率与高电阻对应于砖块、混凝土块、水泥地坪等位置。

4)通过利用高密度电法对 GEM 的刻画对比,以及现场开挖验证,总结了地区相对经验性的深度校正公式,较好地解决了地下建筑垃圾埋深问题,在新的类似实践工作中,可完全利用 GEM 替代高密度电法,实现快速检测的目的。

5)对两种方法在减量化土地中进行了探测应用,取得了一些的成果,但对于多频电磁法探测数据进行深度反演还需要继续探索。

#### 参考文献:

[1] 刘小松.浦东新区减量化工作实践及思考[J].上海土地,2020(4):33-40.

LIU X S. Practice and consideration of reduction in Pudong, Shanghai[J]. Shanghai Tudi, 2020(4):33-40.

(In Chinese)

[2] 朱巍巍.城市建设用地减量化研究—以郑州市为例[D].郑州:郑州大学,2018.

ZHU W W. Study on the reduction of urban construction land take Zhengzhou as an example[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (In Chinese)

[3] 刘兆平.地球物理方法在垃圾填埋场的应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010.

LIU Z P. Geophysical methods in the application analysis of Landfill[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010. (In Chinese)

[4] 赵云鹏.高密度电阻率法与探地雷达对典型污染的模拟与应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.

ZHAO Y P. Research on Simulation and Application of typical pollutants by High-density electrical and ground penetrating radar[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018. (In Chinese)



图 13 复垦开挖照片

Fig. 13 Photos of reclamation and excavation

- [5] 何委徽. 高频电磁法结合高密度电法综合确定垃圾填埋场分布[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(1): 19—23.

HE W H. Application of high density electrical method and high frequency electromagnetic method to landfill site exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(1): 19—23. (In Chinese)

- [6] 程业勋, 刘海生, 赵章元. 城市垃圾污染的地球物理调查[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(1): 26—30.

CHENG Y X, LIU H S, ZHAO Z Y. Investigation of urban landfill contamination using geophysical methods

[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(1): 26—30. (In Chinese)

- [7] 陈耀军. 瑞雷波法和地质雷达法在查找填埋垃圾充填边界中的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 2013(4): 566—570.

CHEN Y J. Comprehensive application of the rayleigh wave method and ground penetrating radar method to detecting the filling boundary of the landfill[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013(4): 566—570. (In Chinese)

- [8] 杨超, 黄丹, 朱伟, 等. 基于高密度电阻率法的地下建筑

- 基础探测[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 244—251.
- YANG C, HUANG D, ZHU W, et al. Application of high density resistivity method in detection of underground obstacles[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(2): 244—251. (In Chinese)
- [9] 杨峰, 彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- YANG F, PENG S P. Study on principle and method of ground penetrating radar detection[M]. Beijing: Science Press, 2010. (In Chinese)
- [10] I. J. WON, DEAN A, KEISWETTER, et al. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1996, 1(2): 129—137.
- [11] HAOPING HUANG and I. J. WON. Conductivity and susceptibility Mapping using broadband electromagnetic sensors[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2000, 5(4): 31—41. (In Chinese)
- [12] RAHMAN YACCUP, PETER BRABHAM. Ground Electromagnetic Survey (GEM-2) technique to map the hydrocarbon contaminant dispersion in the subsurface at Barry Docks, Wales, UK[C]. Kuala Lumpur, Malaysia; Awam International Conference of Civil Engineering, 2012: 1—8.
- [13] 吴超凡, 邱占林, 杨胜伦, 等. 网络并行高密度电法与传统电法超前探测效果对比[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 136—140.
- WU C F, QIU Z L, YANG S L, et al. A comparison of advanced detection effect between the network parallel electrical method and the traditional method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 136—140. (In Chinese)
- [14] 刘盛东, 刘静, 戚俊, 等. 矿井并行高密度电法技术体系与新进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2336—2345.
- LIU S D, LIU J, QI J, et al. Applied technologies and new advances of parallel electrical method in mining geophysics[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2336—2345. (In Chinese)
- [15] 曹煜, 刘盛东, 唐润秋, 等. 电法并行采集 AM 排列推导 ABM 排列技术研究[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1157—1165.
- CAO Y, LIU S D, TANG R Q, et al. Research on the derivation of ABM array for parallel acquisition of AM array technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1157—1165. (In Chinese)
- [16] 上海勘察设计探测院(集团)有限公司. DG/TJ08—2271—2018 工程物探技术标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018: 143.
- SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd. DG/TJ08—2271—2018 Technical standard for engineering geophysical prospecting[S]. Shanghai: Tongji University Press. (In Chinese)
- [17] 张辉, 杨青, 胡饶, 等. 电法勘探在探测加油站石油烃污染中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1116—1117.
- ZHANG H, YANG Q, HU R, et al. The application of electrical method to detecting petroleum hydrocarbon contamination in a gas station[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1116—1117. (In Chinese)
- [18] 何晓萍. GEM-2 数据处理与反演方法研究及其在冰厚度探测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HE X P. The study of GEM-2 data processing and inversion methods for Sea-ice thickness detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (In Chinese)
- [19] 刘盛东, 刘士刚, 吴荣新, 等. 网络并行高密度电法仪与稳态电法勘探方向[J]. 中国科技成果, 2007, 7(24): 31—36.
- LIU S D, LIU S G, WU R X, et al. Exploration direction of network parallel high-density electrical instrument and steady-state electrical method[J]. China Science and Technology Achievements, 2007, 7(24): 31—36. (In Chinese)
- [20] 曹煜. 并行直流电法成像技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2008.
- CAO Y. The imager technology of concurrent electrical meter[D]. Huainan: Anhui University Of Science & Technology, 2008. (In Chinese)
- [21] I. J. WON, DEAN A, KEISWETTER, et al. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics,

1996,1(2):129—137.

[22] I. J. WON. A wide — band electromagnetic exploration method — some theoretical and experimental results [J]. *Geophysics*, 1980, 45(5): 928—940.

[23] RAHMAN YACCUP, PETER BRABHAM. Ground electromagnetic survey (GEM—2) technique to map the

hydrocarbon contaminant dispersion in the subsurface at Barry Docks, Wales, UK[C]. *AICCE*, 2012.

[24] HAOPING HUANG. Depth of investing for small broadband electromagnetic sensors [J]. *Geophysics*, 2005, 70(65): 135—142.

## Ground electromagnetic survey(GEM—2) technique and parallel electrical method(PEM) to map the distribution of construction waste in the subsurface of reduced land

ZHOU Junfeng<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>, LIU Xiaosong<sup>2</sup>

(1. Shanghai Yuanyi Investigation&Desgin Co.,LTD, Shanghai 201203, China;

2. Shanghai Pudong New Area Planning and Natural Resources Administration, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Shanghai is the first city in China to propose a city—wide reduction of construction land at the provincial level. The critical reduction point is to reduce the construction land with low construction levels outside the urban agglomerated construction areas as determined by urban planning, transforming it into ecological land and arable land through land consolidation and reclamation. Whether it is suitable for agricultural use or not, the distribution and content of construction waste under the reduced land is one of the critical factors determining whether it is used as a qualified agricultural land. It is essential for urban land reduction and reclamation to use geophysical methods to detect the reduced land quickly.

In this paper, the multi—frequency electromagnetic method (GEM—2) and parallel electrical method (PEM) were used to explore a reduced land in Shanghai rapidly. In order to further improve the detection efficiency, the multi—frequency electromagnetic method (GEM—2) was used as the area—fast scanning method, and the parallel electrical method (PEM) was used as the profile sounding method. The distribution characteristics of conductivity at different depths are obtained from the electromagnetic data of five frequencies, which are in good agreement with the inversion results of the parallel electric method. The research shows that the high conductivity area corresponds to the location of the reinforced sewage pool and other structures, while the low conductivity and high resistance correspond to the location of bricks, concrete blocks, and cement floors. Through the use of a high—density electrical method to depict and compare GEM, as well as on—site excavation verification, combined with literature research, this paper summarizes the regional relative empirical depth correction formula, which better solves the problem of buried depth of underground construction waste; In new similar practical work, GEM can be used entirely to replace high—density electrical method to achieve the purpose of rapid detection.

**Keywords:** reduction; construction waste; multi—frequency electromagnetic method; parallel electrical method; a quick scan