

综合物探方法在航道水闸基础定位研究中的应用

杨超^{1,2}

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;

2. 上海元易勘测设计有限公司, 上海 201203)

摘要: 水下闸基础为钢筋混凝土, 具有特殊的工程结构, 与航道内地层、淤泥、水体等环境具有明显的物性差异, 本次利用 GEM-2 多频电磁法清晰准确地探测到了残留水闸的平面边界, 利用高密度电阻率法、孔中磁梯度法较为有效地划定了残留水闸的垂向位置及厚度, 同时结合水下地形扫描, 精细地刻画了残留水闸的三维空间属性。

关键词: 航道; 水闸基础; 多频电磁法; 并行电法; 水下地形扫描; 孔中磁梯度

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.12

0 引言

随着时间的增加, 航道中部分水闸会因水工结构混凝土表面开裂及露筋等自身病险^[1]、航运发展需求等原因而被拆除; 由于拆除不彻底, 一般会在航道底部残留部分基础, 甚至完整底座, 致使货运船只发生搁浅, 危害航行安全。由于拆除年代久远, 竣工资料不完整、不精准、甚至缺失等原因导致拆除的航道水闸空间位置信息缺失, 为此, 需要确定其平面位置和深度、规模等信息。

航道水闸属钢筋混凝土材质, 具有特殊的工程结构, 与航道内地层、淤泥、水体等环境介质具有明显的物性差异。前人在地下(残留)建筑基础等钢筋混凝土结构探测中积累了丰富的经验, 蒲勇^[2]利用井中磁梯度法对城市轨道交通工程建筑物基础进行了探测, 效果显著; 杨超等人^[3]利用高密度电法对地块内残留建筑物基础进行了探测, 清晰地分辨了残留的混泥土地坪; 周俊峰^[4]采用 GEM-2 多频电磁技术对城市主干道路中地下护管桥进行了探测, 明确了护管桥的边界及深度。肖杰^[5]采用单波束测深

仪对水下地形进行了探测, 可清晰反应河湖库区水底地形; 前人的经验积累, 进一步验证了不同方法在特定探测目标中效果显著, 但对于水下残留建筑基础的探查, 前人研究成果及文献少有报道。

基于此, 笔者以某航道残留的水闸基础为研究对象, 在目标区域采用 GEM-2 多频电磁法、高密度电阻率法、孔中磁梯度法、水下地形扫描等几种常用工程物探方法, 为类似航道问题的地球物理勘察提供了实践依据。

1 方法原理及特点

1.1 并行高密度电法(PEM)

并行高密度电法(PEM)实现了所有参与电极的并行激发与采集^[6], 过程中无闲置电极^[7]。与常规传统高密度电法相比, 可同时获取多个测点数据^[8]。主要有两类工作方法: AM法和ABM法^[6]。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^[9-10](图1)。

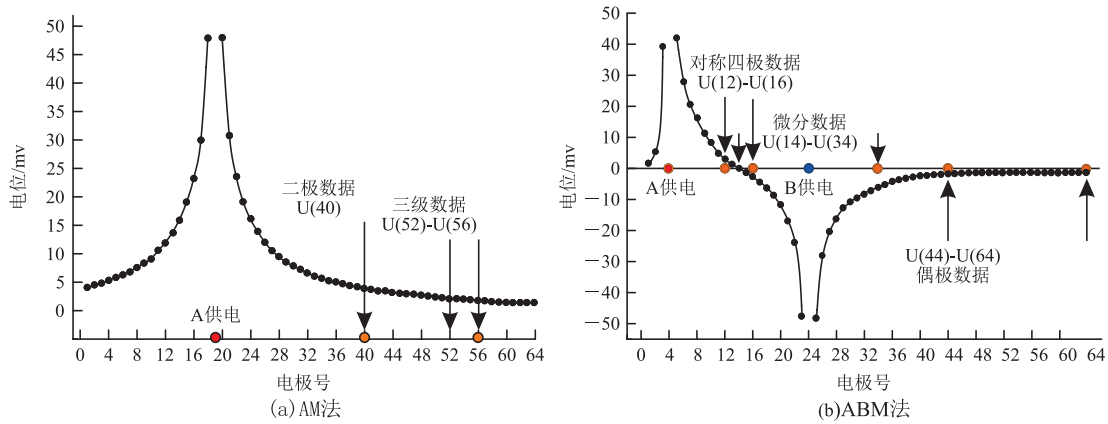


图 1 电位分布及观测装置(据刘盛东^[9]修改)

Fig. 1 Potential distribution and observation device in AM and ABM method

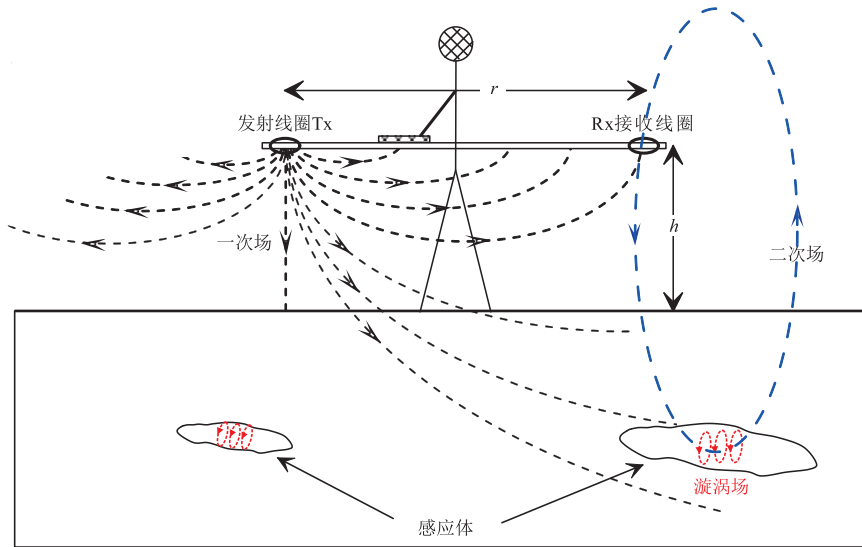


图 2 GEM-2 工作原理图(据 I. J. Won^[12],修改)

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

1.2 多频电磁法

基于介质的电磁特性,通过向地下发射不同频率的电磁波,俗称一次场,从而使地下的良导体(如钢筋结构)中感应出微弱的涡流电场,进而产生被检测和记录的二次磁场^[11](图 2)。GEM-2 的数据处理是去除一次场后保留二次场信号,同时将二次场与一次场做比值(即归一化),并乘以 10^6 ,用百万分之一(ppm)度量^[11]。

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^[11-12]:

$$\frac{H_s}{H_p} = -r^3 \int_0^\infty R(\lambda, \mu, \sigma, \omega) e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda = I + iQ \quad (1)$$

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

其中: H_s :二次磁场

H_p :一次磁场

r :收发线圈距离

h :仪器距地面高度

J_0 :零阶贝塞尔函数

λ :积分变量

μ :磁导率

σ :电导率

ω :角频率

I :同相分量

Q :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。

1.3 磁梯度法

磁梯度法是基于介质的磁性差异,根据一定单位距离内地磁场强度的差异来对地下管线进行测量的一种方法。磁梯度值随探头与探测目标体距离 r 的增加而衰减(图 3),因此规范要求,测试孔与待测目标间距宜小于 1 m ^[13]。

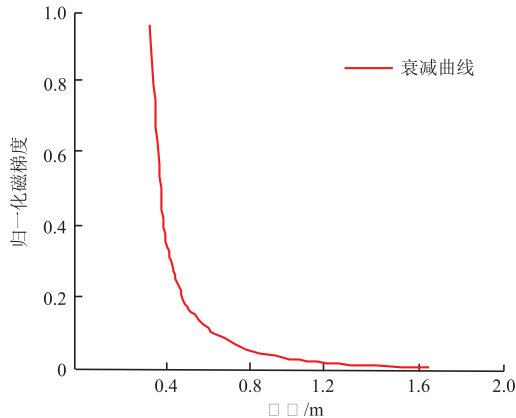


图 3 随距离变化磁梯度峰值衰减曲线^[14]

Fig. 3 The peak attenuation curve of magnetic gradient with distance

1.4 水下地形扫描

单波束测深仪的测量过程是换能器垂直向水下发射一定频率的声波脉冲,已知换能器发射和接收到回波的时间间隔与声波在水体中的平均传播速度,同时结合换能器的吃水深度,则可计算出水面至水底的深度。工作原理与地震勘探方法相似^[15]。

2 测线布置及数据采集

本次探测位于上海某航道,根据现场实际情况,先进行面上扫描,明确水闸初步位置,在此基础上利用不同方法进行纵向探测。

2.1 多频电磁法

1) 探测位置

根据现场实际情况,选择沿航道方向进行探测,剖面起止位置以观测至数据背景场为准(图 4)。

2) 数据采集

采用美国 GEM-2 多频电磁仪,采集同相分量 I 和正交分量 Q ,连续自动测量,默认采样间隔 40 ms ,每 3 个测量数据叠加为一个记录数据,即每 120 ms 记录一个数据,选用 $1\ 525\text{ Hz}$ 、 $5\ 325\text{ Hz}$ 、 $18\ 325\text{ Hz}$ 、 $63\ 025\text{ Hz}$ 等 4 个发射频率。数据处理采用仪器配套软件 EMExport 和 invector 将 GEM 文件中的同向分量及正交分量转换为视电导率及视磁导率,从而进行分析。笔者主

要依据磁导率数据进行分析。

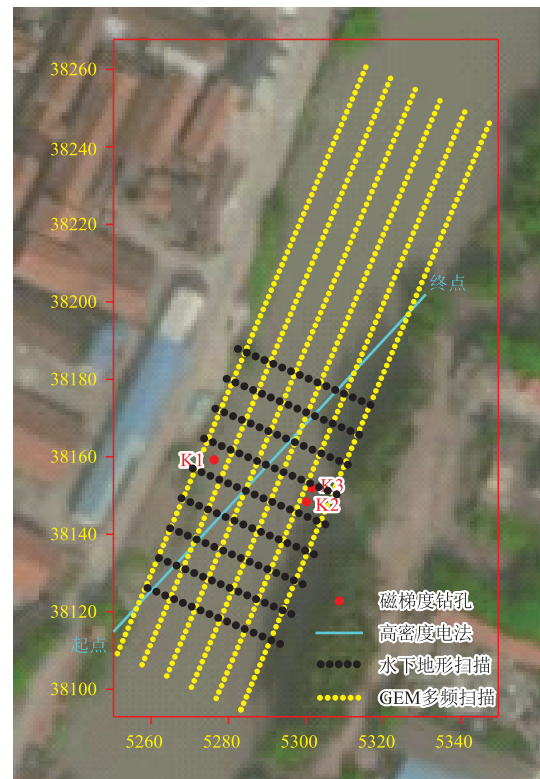


图 4 各方法测线布置图

Fig. 4 The location map of section survey line

2.2 水下地形扫描

1) 探测位置

根据现场实际情况,及相关规范要求,选择垂直航道方向进行水底地形扫描(图 4)。

2) 数据采集

采用华微 3 号无人船测量系统,无人船由 GNSS RTK 卫星定位系统和测深仪组成一套完整的测量系统。网络 RTK 定位技术就是基于载波相位观测的实时动态定位技术,它能够实时快速地提供测站点在指定坐标系中的三维定位结果,并达到厘米级精度。

2.3 高密度电法

1) 探测位置

根据现场实际情况及 GEM 成果分析,选择穿越水闸进行剖面探测(图 4)。

2) 数据采集

采用安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司的 HZE11I 并行高密度电法仪进行数据采集,64 道电极,电极间距 2.0 m 。数据采集采用 AM 法,供电电压 24 V ,供电电流 100 mA ,采样间隔 50 ms 。数据处理采用仪器配套软件 WBD 导出不同类型装置的 res 文件,并进一步采用 RES2DINV 进行反演分析。

2.4 井中磁梯度法

1)探测位置

根据 GEM 结果选择于航道两侧进行磁梯度探测(图 4)。

2)数据采集

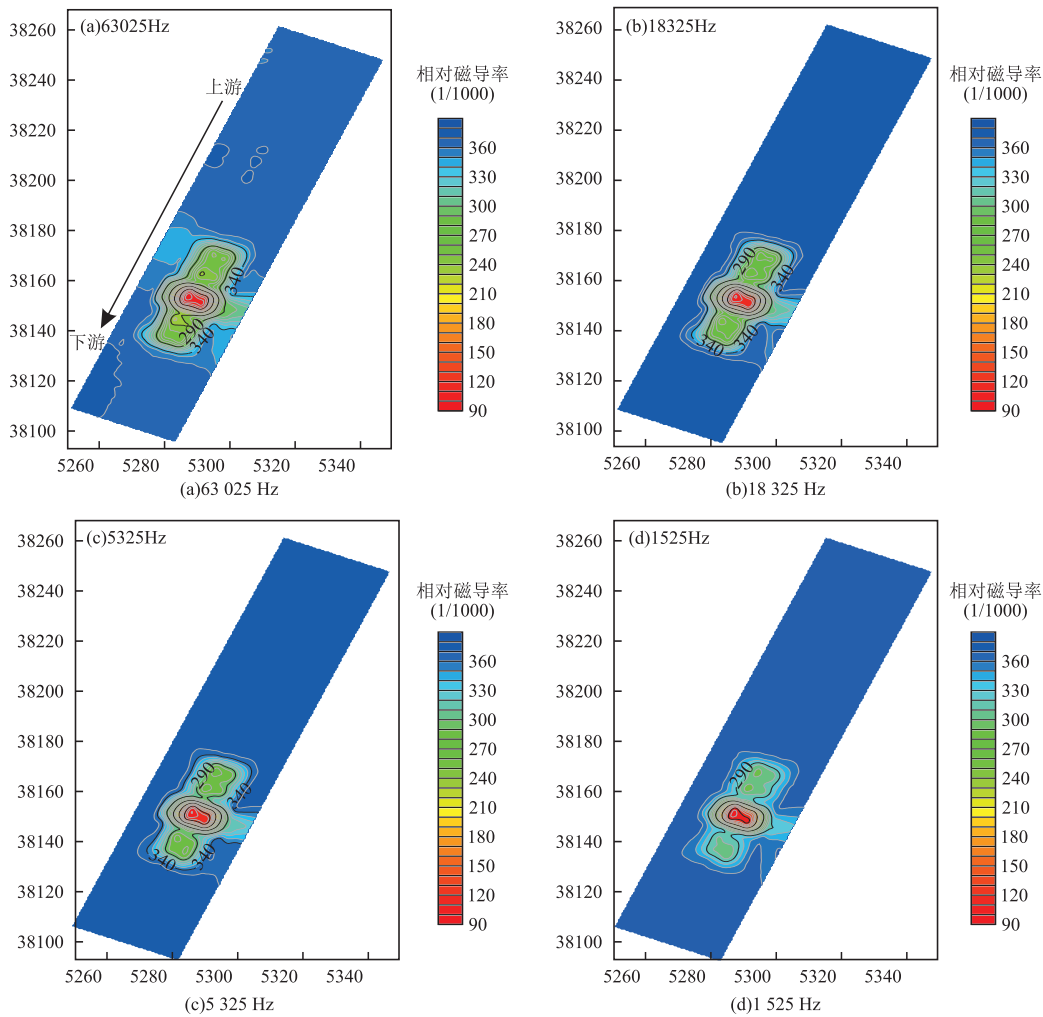
采用廊坊兴尔 XEGT-1 磁梯度仪,根据 GEM 成果位置布置好钻孔,采用人工水冲法,成孔后将 PVC 管下至孔中,随即将磁力梯度仪的探头放到 PVC 管内,从孔底部开始连续拉动线缆,以 0.1 m 的间隔依次向上记录各点的磁梯度值,到达孔顶后再往下探测以做校对。

3 应用效果分析

3.1 多频电磁法(GEM-2)成果分析

I. J. Won^[12] 通过正演模拟从理论上证明,

GEM-2 多频电磁几乎是单极的,异常在目标的正上方。笔者采用 1 525 Hz、5 325 Hz、18 325 Hz、63 025 Hz 等四个工作频率对目标进行了搜索扫描。根据图 5 可知:①不同频率磁导率具有很强的数值范围及梯度边界,且边界清晰,范围相同。由于测线是根据历史区域位置布置,且剖面起止位置以观测至数据背景场为准,结合目标体钢筋混凝土特性,判断该异常即为水下残留闸基础;②从高频到低频,异常轮廓为中部宽,上下两端相对窄的矩形;且不同频率轮廓基本相似,反映水闸从顶部至底部可能无扩大,因此推断该闸总长约 50 m,中部宽约 24 m,长约 12 m;上游端宽约 16 m,长约 20 m;下游端宽约 16 m,长约 18 m。据此,基本确定了水闸边界位置及其结构特征(图 5)。



不同频率的相对磁导率成果,显示了水闸轮廓

图 5 不同频率 GEM-2 相对磁导率数据

Fig. 5 The results from a GEM-2 survey

3.2 水下地形扫描成果分析

分析 GEM 平面结果,在异常区域进行了水下地形扫描。从图 7 可知,水底地形整体为中部高,两端低;即在 GEM 异常的核心部位,水底地形为一平

缓的高平台,并且向两岸突出且有所抬高,两端翼部则相对低缓,其内部伴随有局部洼地,核部与翼部相接的位置为地形陡坎;从航道水底泥面标高断面图(图 6)可明显观察到该特征。

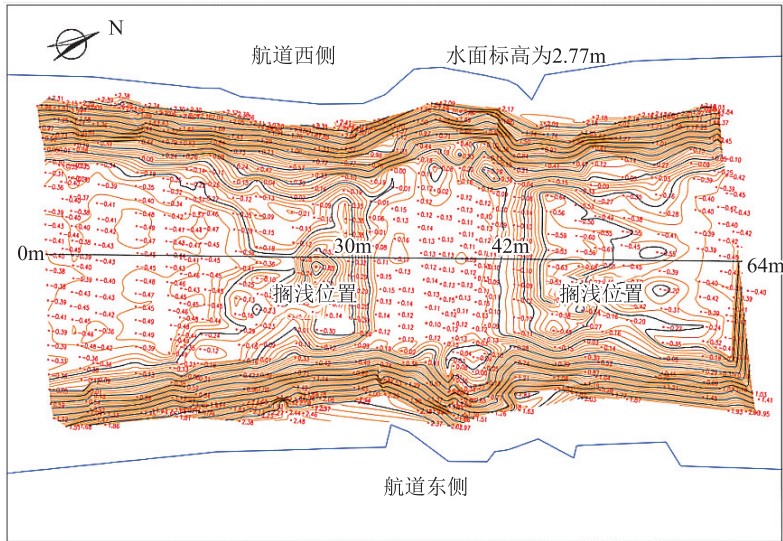


图 6 航道水底地形等值线图

Fig. 6 The topography map of channel bottom

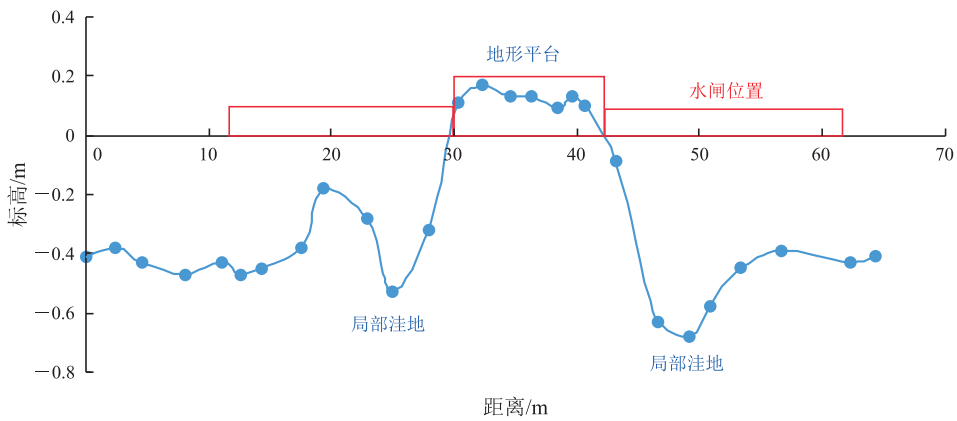


图 7 航道水底地形断面图(沿航道中心线)

Fig. 7 The section map of topography

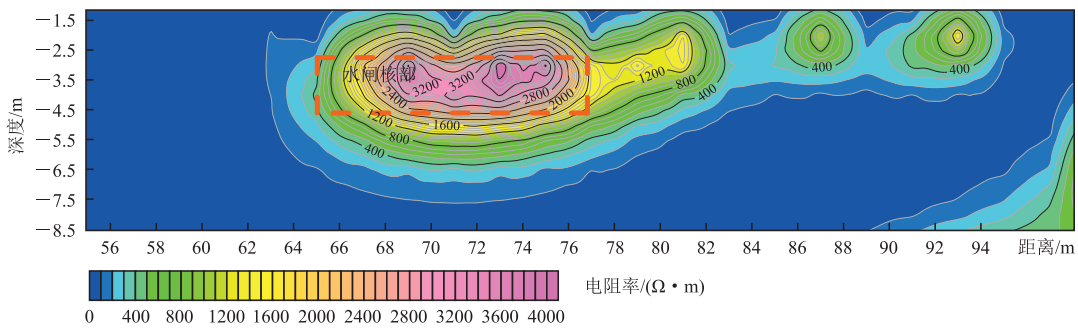


图 8 反演电阻率断面图

Fig. 8 The Inversion section of resistivity

据此,①可判断水闸核部为平缓平台,向两岸突出且有所抬高,两端翼部相对变窄,变低,整体呈矩形,规格尺寸与 GEM 成果一致;②可判断搁浅发生的位置及原因,即无论上行还是下行,当水位下降或者船身加重时,由于船身下降,地形突高,从而在局部洼地与地形陡坎相接的位置发生搁浅(图 6、图 7),这也与该位置经常发生搁浅的实际情况一致。

3.3 高密度电法成果分析

分析 GEM 平面结果,向两岸斜穿主体异常区域进行了高密度电法探测。在剖面 63 m~96 m 区间段,对应电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m} \sim 4.0 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ (图 8),该异常平面边界位置与 GEM-2 异常梯度边界位置完全吻合,可见高密度电法能够准确反映出水闸结构边界。根据剖面穿越 GEM 异常位置,其中 65 m~77 m 区间段为水闸主体,77 m~96 m 区间段为水闸北端翼部,63 m~65 m 为南端翼部(异常未完全显示)。

由于体积效应,从电法反演结果中无法直接确定水闸厚度,因此笔者根据已获得的部分参数对水闸核部进行了正演模拟:顶深 3 m,宽 12 m,厚度

1 m~3.5 m(0.5 m 间隔)。通过正、反演结果特征对比的思想(图 9、图 10),推断水闸核部厚度为 1.5 m~2 m(图 8、图 10)。

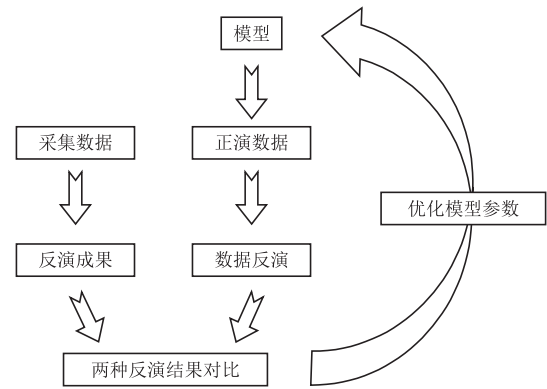


图 9 正、反演对比流程图

Fig. 9 The flow chart of forward and inverse

3.4 磁梯度成果分析

根据不同位置钻孔磁异常信号的强弱等分析,确定了水闸基础的顶、底板埋深:K1 孔深度 2.12 m 处出现极值,根据磁梯度探测理论,地层与含铁磁性

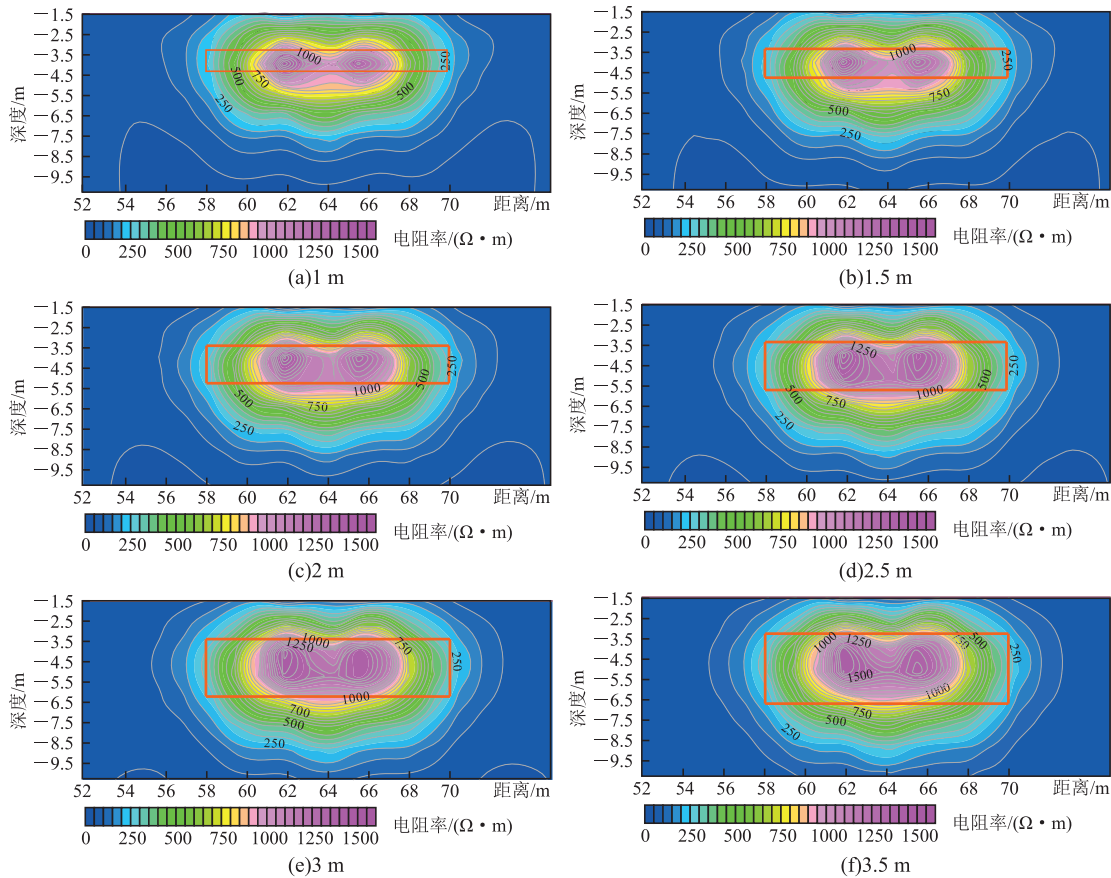


图 10 模型反演电阻率断面图

Fig. 10 The inversion resistivity results of models with different thicknesses

介质界面处会发生磁场强烈变化,因此判断该处为水闸混凝土界面,综合单孔多次数据判断该处界面平均深度为 2 m;同理,K2 单孔多次数据判断该处界面平均深度为 3.8 m;K3 单孔多次数据判断该处上界面平均深度为 2 m,下界面平均深度 3.8 m,下界面以下可能存在碎石或者桩(图 11);综合 K1~K3 磁梯度数据成果,笔者认为该水闸上顶板平均深度 2 m,下底板平均深度 3.8 m,核部厚度为 1.8 m。

3.5 综合成果分析

综合磁梯度成果、高密度电法成果、水底地形测量结果、GEM 多频电磁扫描成果可知,水闸基础为矩形结构,南北总长约 50 m,上、下游宽约 16 m,核部宽约 24 m,厚度 1.8 m(图 12)。以地形数据为基础,融合相关探测参数,建立水闸三维模型(图 13),获得水闸残留体积为 860 m³。

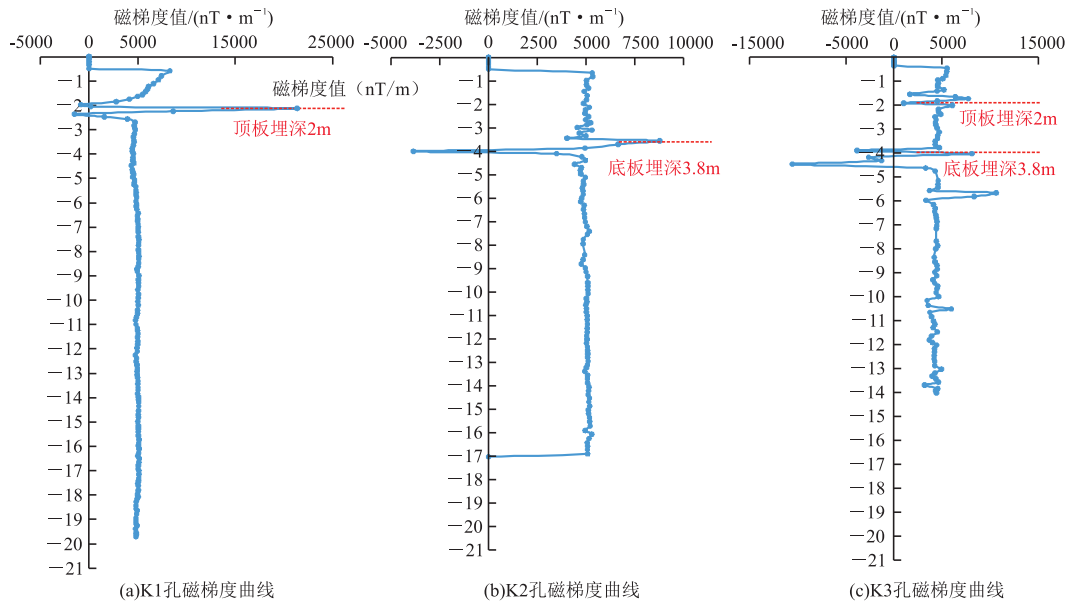


图 11 水闸不同位置磁梯度曲线

Fig. 11 Magnetic gradient curves at different positions

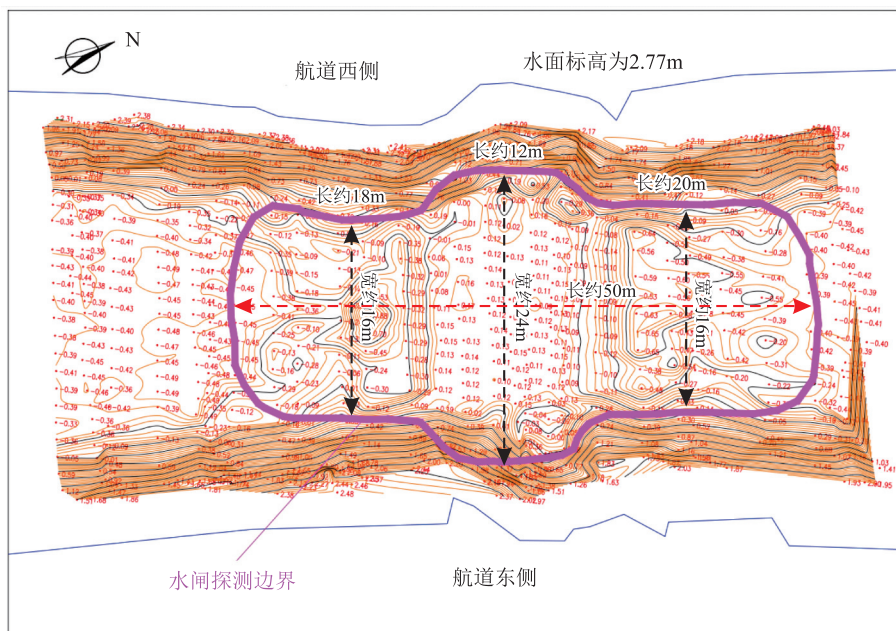


图 12 水闸基础综合解释成果图(底图为地形等值线)

Fig. 12 Interpretation results of sluice foundation by different detection methods

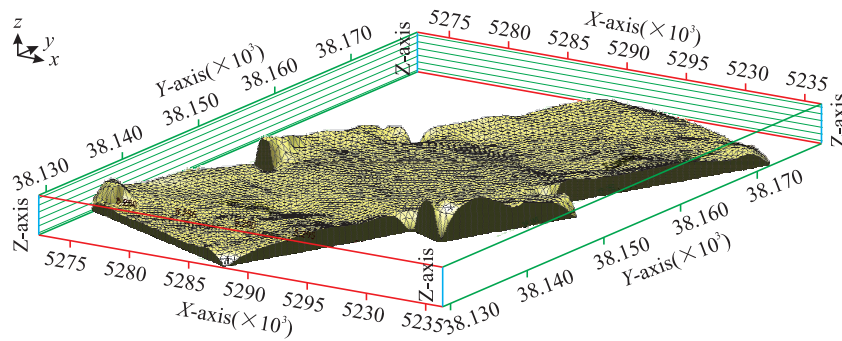


图 13 水闸基础三维空间轮廓模型

Fig. 13 The 3D model of residual sluice foundation

4 结论

综合在航道开展的 GEM-2 多频电磁扫描、水下地形扫描、高密度电法和磁梯度成果,表明各方法可以有效地探测出残留水闸基础的空间位置和结构,各种方法各具特点,结论如下:

1) GEM-2 多频电磁法在水闸边界识别中效果非常明显,且异常位于目标体正上方,外业工作效率和成果处理速度也是所有方法中最高、最简单的。但是,由于钢筋的屏蔽作用,异常无法下穿,仅能反应目标体的平面轮廓及位置。

2) 水下地形扫描不仅能够明显观测到残留的水闸基础轮廓,又能够分析出往来船舶搁浅的原因:即由于残留基础核部地形突高,当水位下降或者船身加重,导致船身下降,从而在局部洼地与地形陡坎相接的位置发生搁浅,这也与该位置经常发生搁浅的实际情况一致。

3) 高密度电法效果明显,可有效探测到残留的水闸边界,但由于其体积效应,无法直接获取较为准确的成果参数,可通过正、反演对比的思想获得相关参数。

4) 磁梯度工作探测到了残留水闸基础的厚度,属于点式探测,是所有探测方法中精度较高的,同时具有一定的验证作用,但开展此项工作前需明确目标的初步位置。

参考文献:

[1] 蔡浚,蔡浩一.上海市病险水闸现状、成因剖析及对策措施[J].大坝与安全,2002,(3):49-50.
CAI J, CAI H Y. Status, formation analysis and countermeasures for defective sluices in Shanghai[J]. Dam

& Safety, 2002, (3): 49-50. (In Chinese)

- [2] 蒲勇. 磁梯度法在城市轨道交通工程建筑物基础调查中的应用[J]. 资源环境工程, 2019; 33(1): 80-82.
PU Y. Application of magnetic gradient method in basic survey of urban rail transit engineering buildings[J]. Resources Environment & Engineering, 2019; 33(1): 80-82. (In Chinese)
- [3] 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)
- [4] 周俊峰. GEM-2 多频电磁技术在地下护管桥探测中的应用[J]. 上海国土资源, 2022, 43(3): 50-52.
ZHOU J F. Application of GEM-2 multi-frequency electromagnetic technology in the detection of underground pipe protection bridge[J]. Shanghai Land & Resources, 2022, 43(3): 50-52. (In Chinese)
- [5] 肖杰. 智能无人船单波束测深系统在水下地形测量中的应用[J]. 测绘工程 2023, 32(1): 63-70.
XIAO J. Application of intelligent unmanned ship single beam sounding system in underwater topographic survey[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2023, 32(1): 63-70. (In Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 何晓萍. GEM-2 数据处理与反演方法研究及其在海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)
- [12] 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.
- [13] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/TJ08—2271—2018 工程物探技术标准[S]. 上海. 同济大学出版社, 2018: 115—116.
- Commission of housing and urban-rural development of Shanghai. DG/TJ08—2271—2018 Technical standard for engineering geophysical exploration [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018: 115—116. (In Chinese)
- [14] 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司. 凌空路航空管道补充探测工作报告[R]. 2007.
- SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd. Report on supplementary detection of aerial oil pipeline [R]. 2007. (In Chinese)
- [15] 来向华, 潘国富, 傅晓明, 等. 单波束测深技术在海底管道检测中应用[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 66—72.
- XIANG L H, PAN G F, FU X M, et al. Application of single-beam echo sounding techniques in submarine pipeline inspection[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 66—72. (In Chinese)

Application of comprehensive geophysical prospecting method in the research on the location of residual sluice foundation at the bottom of the channel

YANG Chao^{1,2}

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Yuanyi Investigation & Design Co., LTD, Shanghai 201203, China)

Abstract: The remaining sluice foundation at the bottom of the channel will affect the normal operation of navigation. To accurately determine the spatial position of the remaining sluice foundation and ensure the safe running of ships, several common engineering geophysical exploration methods such as Gem-2 multi-frequency electromagnetic method, Underwater topographic scanning method, high-density electrical method, and magnetic gradient method are adopted which to compare the effectiveness, and summarize the technical points, and to accumulate technical data and engineering experience for the positioning research of typical obstacles in the channel. The sluice foundation is reinforced concrete, with a special engineering structure which has obvious physical properties different from the stratum, water, and mud. The results show that the plane boundary of the remaining sluice foundation is clearly detected by the Gem-2 multi-frequency electromagnetic method; and the vertical position and thickness are delineated effectively by high density electrical method and magnetic gradient method; and at the same time, combined with the result of underwater topographic scanning, the three-dimensional spatial attributes of the residual sluice were carefully described.

Keywords: channel; sluice foundation; underwater topographic scanning; multi-frequency electromagnetic method; high density electrical method; magnetic gradient method