

# 等值反磁通瞬变电磁法 在长江堤防渗漏隐患探测中的应用

王佟童<sup>1</sup>, 王 媛<sup>1,2</sup>, 任 杰<sup>1,2</sup>, 张志慧<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:**堤防渗漏是堤防工程常见险情之一,性质上多表现为隐蔽性、随机性,早期特征不明显,堤防渗漏隐患部位的准确探查对堤防工程渗漏隐患的防控具有重要意义。瞬变电磁法具有分辨率高、探测速度快、操作简便等特点,适用于堤防渗漏隐患探测的要求。以长江南京段江心洲堤防工程为探查目标,采用等值反磁通瞬变电磁物探技术进行渗漏隐患探测,通过对数据资料进行处理与分析,验证了该方法的可靠性,可为汛期堤防险情排查提供参考。

**关键词:**堤防工程; 渗漏; 瞬变电磁法; 探测

中图分类号:TV871

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2024)02-0058-0005

## Application of equivalent inverse flux transient electromagnetic method in the detection of leakage hidden danger of the Yangtze River dike

WANG Tongtong<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1,2</sup>, REN Jie<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Zhihui<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Dike leakage is one of the common dangers in dike engineering, which is mostly hidden and random in nature, and the early characteristics are not obvious. The accurate detection of the hidden danger of dike leakage is of great significance to the prevention and control of the hidden danger of dike engineering. The transient electromagnetic method has the characteristics of high resolution, fast detection speed, and easy operation, which is suitable for the detection of hidden dangers of dike leakage. This study takes the Jiangxinzhou dike engineering in the Nanjing section of the Yangtze River in Jiangsu Province as the exploration target, and uses the equivalent inverse flux transient electromagnetic geophysical technology to detect leakage hazards. Through data processing and analysis, the reliability of this method has been verified, which can provide reference for the investigation of dike hazards in the flood season.

**Key words:** dike engineering; leakage; transient electromagnetic method; detection

## 1 概 述

堤防工程作为防洪体系的重要组成部分,承担着抗洪防汛、输水排灌的重要任务,堤防工程具有

线路长、隐患复杂、种类繁多、险情易发等特点<sup>[1]</sup>。每临汛期高水位,极易发生管涌、流土、散浸、漏洞等险情,如不能及时发现渗漏,可能导致堤坝决口等灾害,使得农田被淹、房屋被毁,甚至造成决堤、

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021075); 国家自然科学基金长江水科学联合重点基金项目(U214020023)

作者简介: 王佟童(1993—),女,博士研究生,主要从事堤防工程等方面研究。E-mail: 200202020017@hhu.edu.cn

通信作者: 任杰(1991—),男,讲师,博士,主要从事隐患智能探测研究工作。E-mail: rj@hhu.edu.cn

垮坝等事故。目前,汛期堤防渗漏险情巡检主要以人工为主,结合堤防渗漏险情隐蔽性、时空随机性及早期特征不明显等性质,人工昼夜拉网式巡检极难实现渗漏险情高效探查。因此,迫切需要一种堤防渗漏险情现代化快速探测技术,提高渗漏险情的精准辨识能力,实现渗漏险情高效定位,对控制险情进一步发展,提高堤防抢险成功率,防止堤坝溃决事故发生具有重要作用。

工程实践表明,电阻率对堤防工程渗漏水响应较为敏感,低阻异常区揭示的隐患体特征更加直观、可靠<sup>[2]</sup>。近年来,电磁探测技术被应用于堤防渗漏隐患探测<sup>[3]</sup>,技术主要包括高密度电法<sup>[4]</sup>、瞬变电磁法<sup>[5]</sup>、地质雷达法<sup>[6]</sup>等。瞬变电磁法也称为时间域电磁法(TEM),是近年来水利工程隐患探查广泛应用的无损检测技术,具有异常响应强、位置分辨率高、探查速度快、便携、操作简单等优点,能够实现堤坝裂缝、洞穴、松软层、高含砂层等隐患的详细探查。国内早期发展的瞬变电磁仪探测深度通常为25~50 m<sup>[7]</sup>,等值反磁通瞬变电磁法的发展较好地弥补了存在探测盲区的缺陷<sup>[8]</sup>,有望实现堤防工程浅层缺陷的快速精细探测,但等值反磁通瞬变电磁法在堤防工程中的实际应用还较少。

本文以长江干堤南京江心洲堤防工程为试验对象,应用等值反磁通瞬变电磁仪进行实地探测,并运用“烟圈理论”对探测数据进行反演解译<sup>[9]</sup>。通过与现场地质资料进行对比,验证了等值反磁通瞬变电磁法在堤防渗漏隐患探测中的良好应用效果。

## 2 方法原理

### 2.1 等值反磁通瞬变电磁法工作原理

瞬变电磁法是以地壳中岩(矿)石的导电性与导磁性差异为主要物质基础,根据电磁感应原理,利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场,观测分析脉冲电流断电瞬间感应涡流产生的二次磁场的空间与时间分布规律。通过实际应用已知,地下构造含水率越高,所产生的感应涡流场越强。目前,瞬变电磁法普遍将感应线圈测量磁场的变化率作为接收方式,在发射电流关断时,接收线圈本身产生感应电动势,同时叠加在地下涡流场产生的感应电动势之上,从而造成瞬变电磁实测早期信号失真,形成浅层探测盲区。

等值反磁通瞬变电磁法<sup>[10]</sup>是一种新型瞬变电磁勘探技术,该方法的装置采用上下平行共轴且几

何参数完全相同,磁矩相等的线圈通以反向电流作为发射源。在双线圈源合成的一次场零磁通平面上布设接收线圈,其一次场磁通始终为零,而地下空间一次场仍然存在,等值反磁通瞬变电磁一次场关断时,接收线圈可以测量对地中心耦合的纯二次场。因此,等值反磁通瞬变电磁法能够缓解传统瞬变电磁法存在浅层探测盲区的缺陷,同时装置采用双线圈源,相较于传统瞬变电磁法的单线圈源对地中心耦合场能量更为集中。等值反磁通瞬变电磁法基本原理如图1所示,发射线圈为反向串联上下平行共轴的相同线圈,切电流同步等值反向,接收线圈置于双线圈源正中间一次场零磁通平面,与双线圈源形成共轴。

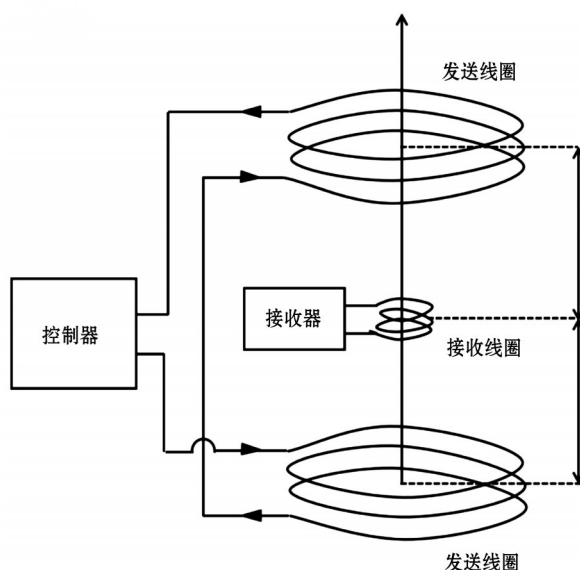


图1 等值反磁通瞬变电磁方法原理示意

### 2.2 等值反磁通瞬变电磁探测数据烟圈反演原理

等值反磁通瞬变电磁法所采集的数据为感应电动势随时间变化规律,探测数据反演就是将感应电动势随时间变化解释为电阻率随深度变化,完成瞬变电磁法探测数据的直观解释。通过研究断电后二次涡流的分布情况,提出“烟圈效应”的概念<sup>[11]</sup>,将任一时刻的涡电流产生的磁场等效为一个水平环状的线电流产生的磁场,感应涡流场在地表引起的瞬变电磁响应为地下各个涡流层的总效应,并且地下涡流场向下、向外扩散。在此理论基础上,相关学者认为均匀半空间地表线圈激发的阶跃瞬变响应可以用环形电流来表示,各涡流层总效应可近似地用环形电流进行叠加等效,从而提出相对简单快速的近似反演方法<sup>[12]</sup>。

### 3 现场应用

#### 3.1 探测区域工程概况

长江干堤南京江心洲堤防位于南京市建邺区,江堤长 22.38 km。根据 2020 年现场调研情况,江心洲堤防薄弱环节为穿堤建筑物段、渡口段、新老堤结合段,堤身未发现明显状况,新老堤结合段和部分穿堤建筑物重叠(排涝站),部分排涝站出现渗水情形。基于上述情况,2020 年汛期运用等值反磁通瞬变电磁仪,对长江干堤南京江心洲堤防险情段进行探测工作。

#### 3.2 测区数据采集

将等值反磁通瞬变电磁仪(图 2)应用于江苏南京江心洲堤防工程,通过物探手段对堤防工程进行探测,确定是否存在渗漏点及其位置。本次探测工作所应用的瞬变电磁探测系统主要由 3 部分组成。

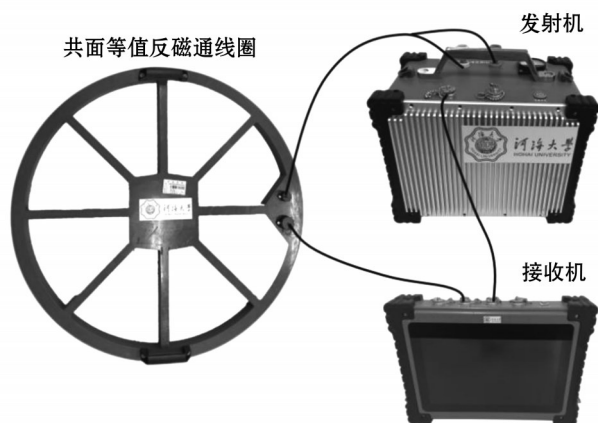


图 2 等值反磁通瞬变电磁探测系统

(1)发射系统。包括发电装置及发射机,发射机由 12 V 的电瓶供电,发射机产生一定强度的电流供给发射线圈,从而在地下建立起一次场。

(2)接收系统。由数据采集装置单独构成,系统性能参数为 2 G 内存,120 G 硬盘,2.24 GHz 双核处理器。具有操作无延迟的特点,主要功能为对信号进行放大、模数转换、采样和存储。

(3)共面等值反磁通线圈。由发射接收一体式线圈构成,线圈模块及装置具有抗干扰特性。

根据此次探测任务的需求,在堤坝顶部布置 1 条测线,测线编号为 JXZ01,长度为 95 m,测点点距为 1 m,共布设 95 个测点。测线布置示意如图 3 所示。

为减小地形影响和各类干扰,提高信噪比,在

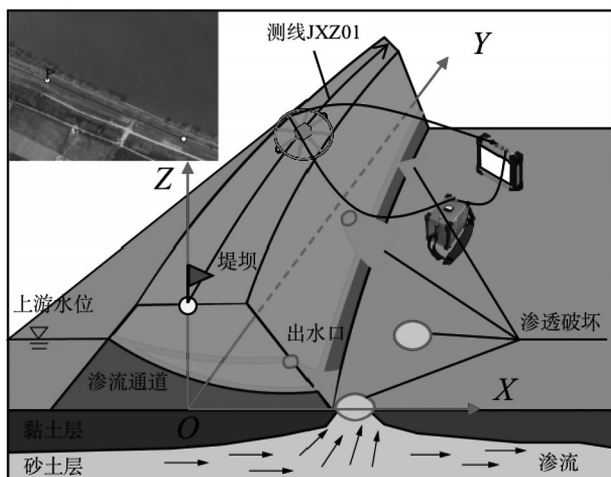


图 3 物探测线 JXZ01 布置示意

探测过程中,技术上采用多次叠加,增大发射电流,提高信噪比。本次采用参数为:瞬变电磁发射机工作电压为 12 V,供电电流档为 100 A,测点叠加次数为 30 次。

为了保证所采集的物探数据保持较高精度,此次探测工作应遵守以下要求:

(1)测线及测点布置做好标记工作,避免探测过程中因测线或测点标记不明而影响工作效率;

(2)探测前对所布设测线及测点进行巡查,对金属等干扰物进行清除;

(3)探测前自检仪器,确保发射机与接收机为开机状态;

(4)每次测量前,确保发射机、接收机与感应线圈连线为通路状态,合格后方可进行观测;

(5)探测过程中应严格执行相关技术规范;

(6)进行数据采集工作时,发射机、接收机与感应线圈应保持一定安全距离,避免相互干扰影响数据质量;

(7)在数据采集过程中,接收机应进行多次重复采集,保证采集数据误差在允许范围之内;

(8)时刻关注数据的采集过程,若接收或发射机端出现问题应及时检查,解决问题并重新测量;

(9)各测点坐标应与参数准确设定,数据采集完成注意及时保存;

(10)每次采集过后应检查数据质量,若不符合要求应重新采集数据。

#### 3.3 数据处理

本次探测目的是根据探测资料,进行反演判定堤防工程是否存在渗漏及渗漏点位置,而探测资料的反演与解释工作,实质是通过数学手段将实测数



据所形成的地下岩体数据模型转化为地质模型,进而推测出地层含水情况。数据反演基于“烟圈理论”计算视电阻率和视深度,计算得到的反演结果能够有效地显示数据设定的地电模型的大致形态,有助于提高实际反演解释工作的效率与准确性。

本研究采用等值反磁通瞬变电磁仪并配套专用软件,对探测数据资料进行时间道设置、参数设置、去噪滤波及烟圈反演处理,具体反演流程见图4。

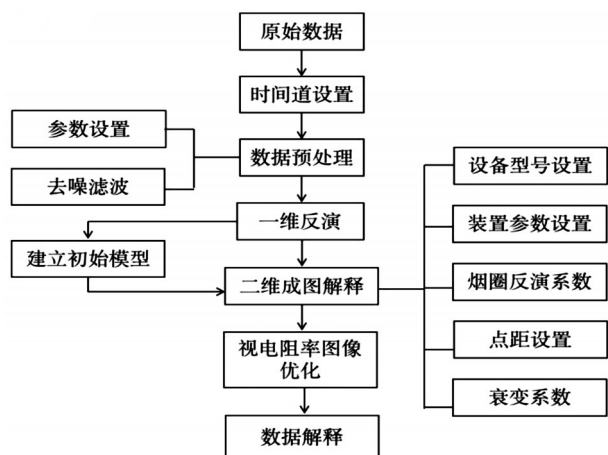
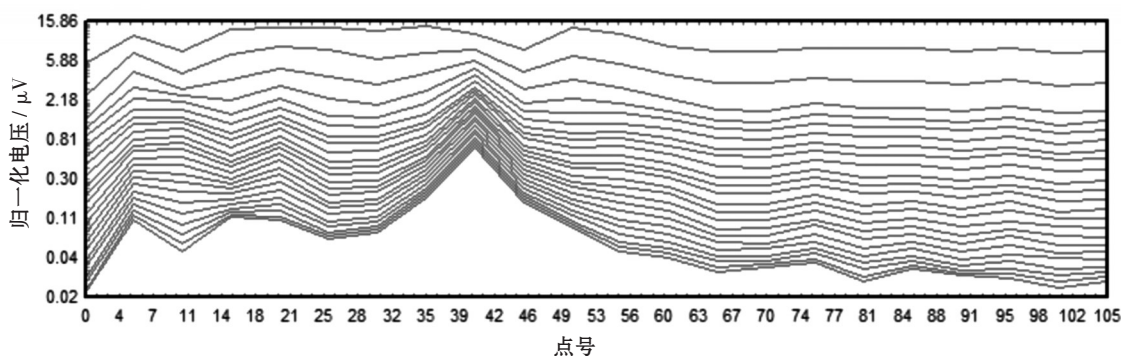


图4 等值反磁通瞬变电磁数据处理流程

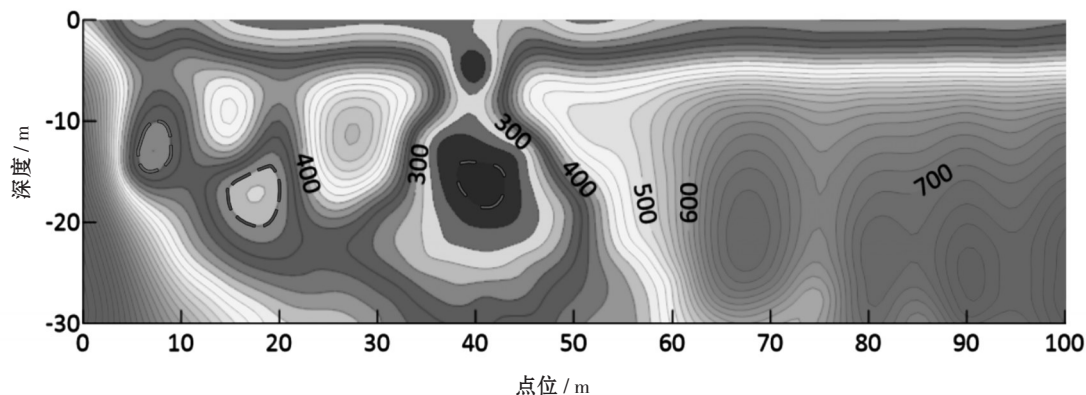
### 3.4 数据解释

本次探测工作的主要目的查明堤防工程是否存在隐患及隐患的位置,为汛期查险工作提供参考。根据数据处理工作得到测线JXZ01探测断面的解释资料如图5所示。

根据图5(a)可知,测线JXZ01从起点开始40 m位置多测道曲线显著抬升,反演计算得到的电阻率值偏低。由图5(b)可知显著的低阻异常区,似电阻率范围为 $212.34\sim 218.36\ \Omega\cdot\text{m}$ ,经过现场勘查验证发现测线40 m位置为排水泵站管道所在地,验证了物探结果的准确性。同时,根据图5(a)可知,测线JXZ01从起点开始起算7 m及17 m位置多测道曲线具有抬升趋势,由图5(b)可知相对于排水泵站管道的低阻异常区域,7 m及17 m位置为稍次之的低阻异常区,其似电阻率范围分别为 $301.26\sim 317.71\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $277.79\sim 294.21\ \Omega\cdot\text{m}$ 。排水泵站管道低阻异常区探测结果的准确性,验证了所探测出的2处低阻异常区具有合理性,推测测线7 m位置及17 m位置存在潜在渗漏隐患,因此,应将测线7 m及17 m位置处作为汛期排险查险的重点关注区域。



(a) 多测道图



(b) 视电阻率图

图5 测线JXZ01探测断面

## 4 结 语

本文详细介绍了等值反磁通瞬变电磁探测技术,基于“烟圈理论”的瞬变电磁探测数据反演方法。以长江干堤南京江心洲堤防工程为试验对象,对堤防隐患进行探查,并与现场地质资料进行对比,发现反演方法具有良好的应用效果。

(1)等值反磁通瞬变电磁仪基于传统瞬变电磁仪进行改进,采用体积较小的发射与接收一体式线圈,重量相对较轻。对于现场数据采集施工相对方便,且能够缓解探测工作中具有浅层盲区的缺陷,最小探测距离可在地面以下1 m内,对堤防工程隐患探测具有较好的适用性及较高的灵敏度。

(2)将等值反磁通瞬变电磁应用于南京江心洲堤防工程,运用“烟圈理论”对探测数据进行反演处理,完成感应电动势随时间变化到视电阻率随深度变化的转换。根据视电阻率图像确定南京江心洲堤防工程存在低阻异常部位,并与现场地质资料进行对比,验证探测结果的可靠性,表明反演方法具有较高的解译精度。

### 参考文献:

- [1] 张雄华,申志高,申权.堤坝管涌隐患探查技术研究[J].湖南水利水电,2019(3):31-33.
- [2] 李宏恩,徐海峰,李铮,等.地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究[J].地球物理学进展,2019,34(4):1627-1634.
- [3] 刘现锋,谢向文,马若龙,等.综合物探技术在复杂土质堤防隐患探测中的应用[J].人民黄河,2020,42(12):41-44.
- [4] 孙卫民,孙大利,李文忠,等.基于时移高密度电法的堤防隐患探测技术[J].长江科学院院报,2019,36(10):157-160.
- [5] 孙忠,冀振亚,王德荣,等.瞬变电磁法在堤坝渗漏隐患探测中的应用[J].地质装备,2018,19(3):13-15.
- [6] 武桂芝,张宝森,李春江,等.阵列地质雷达在黄河堤防隐患探测中的应用[J].人民黄河,2020,42(8):113-116.
- [7] 房纯纲,葛怀光,鲁英,等.瞬变电磁法探测堤防隐患及渗漏[J].大坝观测与土工测试,2001(4):30-32.
- [8] 廖志伟,邹其峰.等值反磁通瞬变电磁与地质雷达组合在塌陷渗漏探测中的应用[J].世界有色金属,2022(7):169-171.
- [9] 郭士明,谢向文,廖先.基于拖曳式瞬变电磁法的渠堤工程快速检测技术研究[J].人民黄河,2022,44(6):129-133.
- [10] 席振铎,龙霞,周胜,等.基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J].地球物理学报,2016,59(9):3428-3435.
- [11] 李锋平,杨海燕,邓居智,等.地面瞬变电磁法一维烟圈反演技术研究[J].地球物理学进展,2016,31(2):688-694.
- [12] 蒋邦远.磁源TEM测深一维反演经验式及应用效果[J].物探与化探,2000(2):99-104.