

拖曳式高分辨瞬变电磁系统在洪泽湖堤防渗漏检测中的应用研究

徐 铭¹ 郭明珠¹ 陈昌仁² 付 兵¹ 王海伟¹ 韦 勇¹ 李 欣¹ 王 伟¹

1.江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223100

2.江苏省水旱灾害防御调度指挥中心, 江苏 南京 210000

[摘要]洪泽湖复合土质老堤普遍存在多层杂填土与深部透水砂层交互赋存的地层结构, 隐蔽渗流通道识别长期面临探测深度不足、巡检效率偏低的现实难题。以洪泽湖Ⅰ级防洪大堤为研究载体, 本文针对性开发车载拖曳式瞬变电磁成套探测系统, 完成 60A 大功率发射单元、屏蔽减震接收线圈硬件适配优化, 依托现场地层实测参数搭建三维电性仿真模型, 配套渗漏定量算法与数字孪生渗流分析平台, 形成本地化完整监测技术框架。对照仿真结果表明, 该设备对 3~28m 区间渗流通道空间匹配度约 93.7m, 参数计算误差控制在 0.8m。整套软硬件一体化方案可为国内同类型多层历史土堤长效渗漏普查提供可参照的装备优化思路与标准化监测范式。

[关键词]拖曳式瞬变电磁; 洪泽湖堤防; 渗漏隐患探测; 大功率发射

DOI: 10.64635/ja.2026.1389

中图分类号: P631.325

文献标识码: A

Application of a Towed High-Resolution Transient Electromagnetic System in Seepage Detection of Hongze Lake Levees

Xu Ming¹, Guo Mingzhu¹, Chen Changren², Fu Bing¹, Wang Haiwei¹, Wei Yong¹, Li Xin¹, Wang Wei¹

1. Jiangsu Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office, Huai'an, Jiangsu 223100, China

2. Jiangsu Provincial Dispatching and Command Center for Flood and Drought Disaster Prevention, Nanjing, Jiangsu 210000, China

Abstract: Old composite earth levees around Hongze Lake commonly feature stratigraphic structures in which multiple layers of miscellaneous fill coexist with deep permeable sand layers. The identification of hidden seepage channels has long faced practical difficulties such as insufficient detection depth and low inspection efficiency. Taking the Grade I flood-control levee of Hongze Lake as the research carrier, this paper develops a vehicle-mounted towed transient electromagnetic integrated detection system. Hardware adaptation and optimization are completed for a 60 A high-power transmitting unit and a shielded vibration-damping receiving coil. Based on measured on-site stratigraphic parameters, a three-dimensional electrical simulation model is established, and a quantitative seepage algorithm and a digital-twin seepage analysis platform are integrated to form a complete localized monitoring technology framework. Comparison with simulation results shows that the equipment achieves a spatial matching degree of approximately 93.7% for seepage channels within the depth range of 3–28 m, and the parameter calculation error is controlled within 0.8 m. The integrated software–hardware solution can provide a referential equipment optimization approach and a standardized monitoring paradigm for long-term seepage surveys of similar multilayer historical earth levees in China.

Keywords: towed transient electromagnetic method; Hongze Lake levee; seepage hazard detection; high-power transmission

引言

洪泽湖大堤是淮河下游核心Ⅰ级防洪工程, 堤体经多代分层填筑, 杂填土、古冲洪积砂层交错分布, 枯水期至汛期水位持续变化易诱发隐蔽渗流、管涌险情, 隐患集中赋存于 0~30m 地层区间。当前主流堤防渗漏检测手段存在明显适配短板, 传统定点瞬变电磁发射电流普遍低于

30A, 20m 以下地层信号衰减幅度可达 65%, 人工钻探全线普查周期超过 15d, 难以适配长线堤防动态排查需求。市面上移动式电磁探测装备多面向路基、矿山场景开发, 未针对堤顶金属构件工频干扰增设屏蔽结构, 野外采集数据信噪比下降幅度可达 40%, 且缺少配套渗流动态仿真体系^[1]。

梳理现有水利物探相关文献, 多数研究侧重反演算法

迭代,针对河湖老旧堤防大功率车载拖曳装备软硬件一体化适配的系统性研究偏少,多数数值仿真简化地层非均质特征,定量结论工程落地性存在局限。针对上述研究与工程双重缺口,本文以数值模拟作为核心论证手段,不开展现场实体试验,围绕发射功率、探测深度、移动巡检效率开展装备定向优化,同步构建渗流数字孪生模型,梳理适配本地堤防的标准化监测流程,形成一套完整的移动式渗漏检测技术路径。

1 洪泽湖堤防工程特征与装备适配设计约束

1.1 堤身堤基地层电性与渗漏病害赋存特征

基于洪泽湖大堤原位取样电性测试数据开展前置分析,整套设备研发的核心约束条件可依托地层与病害规律完成锚定。大堤填筑体横向、纵向电性参数均存在显著空间非均质性,埽工填筑层是渗漏病害最高发区域,腐解空洞内部土体含水率稳定维持在 42%~58% 区间,对应视电阻率 $8\sim 22\Omega\cdot m$,原状黏土区间为 $60\sim 120\Omega\cdot m$,两类介质差值超过 3 倍,电性区分度清晰。大堤下部老堤身混杂块石与淤泥土,局部孔隙持续发育会形成小型渗流通道,该区域土体视电阻率介于 $30\sim 50\Omega\cdot m$,与隔水黏土差值仅 1~2 倍,信号区分能力弱于埽工空洞。向下延伸至堤基区域,饱和粉细砂、中粗砂透水层渗透系数 $1.2\times 10^{-3}cm/s$,相较隔水层高出三个数量级,砂层埋深集中于 10~28m 区间,完全覆盖本次装备预设 30m 探测深度区间,也是汛期管涌险情的主要载体。

调取近 10 年堤防安全鉴定档案与汛期险情处置台账,区域渗漏病害可划分三级风险类型,其中高风险为埋深 10~28m 古砂层管涌,中风险为浅层离散埽工空洞渗漏,低风险为穿堤构筑物界面渗漏,三类病害配套差异化探测难点。高风险古砂层管涌埋深数值偏大,渗流通道呈现连续条带状分布特征,30A 以下小功率设备激励磁场穿透损耗超 70%,难以捕捉深部低阻信号。中风险埽工空洞点位空间分布呈现离散状态,低阻异常横向宽度多低于 2m,很容易被堤身杂填土带来的地层杂波完全掩盖。低风险穿堤涵闸界面渗漏沿金属构筑物缝隙发育,金属构件会形成强电磁背景干扰,常规设备无法区分金属响应与渗流低阻信号。除地层与病害本身带来的探测阻碍之外,大堤全线硬化堤顶总长超过 60km,汛期应急排查要求单日有效探测里程不低于 10km,定点式物探间断采集模式单日里程不足 1km,时效差距达到 10 倍,地层、病害、现场工况三类条件相互叠加,共同构成本次装备研发的硬性约束边界。

1.2 拖曳式瞬变电磁系统量化设计指标

从前文地层、病害、巡检时效三重约束出发,本文提出四项分级量化设计指标,以探测深度、发射电流两项核心指标为研发重点,采集速度、降噪抑制为配套优化指标,各项指标对应解决一类可量化工程缺陷。60A 稳定发射电流为核心一级指标,该参数可将 30m 深度地层感应信号幅值提升 100%,直接缓解深部砂层 65% 幅度的信号衰减问题。30m 有效探测深度同为一级核心指标,能够完整覆盖 0~28m 全段隐患埋深区间,杜绝深部砂层漏判问题。10km/h 连续采集为二级时效配套指标,依托移动采集模式单日可完成 10km 堤段,相较定点设备时效提升 10 倍。硬件屏蔽搭配软件滤波为二级降噪配套指标,协同作用可将沿线金属构件电磁噪声抑制幅度控制在 70% 以上,保障低阻空洞信号信噪比达标。整套自研拖曳式瞬变电磁系统硬件结构、数据处理算法均围绕四级量化指标开展定向优化^[2]。

2 拖曳式高分辨瞬变电磁成套探测系统协同研发

2.1 车载一体化系统整体架构

为适配洪泽湖 60km 硬化堤顶长距离连续巡检工况,轻型检测车后置拖曳集成架构完成定制化设计,整套自研拖曳式瞬变电磁系统划分为五大功能模块。各模块依靠专用通信总线实现硬件同步联动,全程无需离线数据中转环节,有助于压缩野外现场作业耗时。五大模块分别为车载移动承载平台、60A 大功率直流发射子系统、减震屏蔽阵列接收线圈、厘米级 RTK 定位单元、高速实时采集解析终端。实际作业过程中,接收线圈依靠三级弹簧减震拖曳支架固定于车辆尾部,车辆匀速行驶阶段系统同步完成电磁信号采集、测点坐标标定、原始数据降噪、视电阻率初步反演全流程作业。对比传统定点设备,这套架构彻底消除线圈拆装、单点静置采集带来的时长损耗,单点作业耗时可由 15min 压缩至 0.18s。系统统一设定采集频率 50Hz,测点纵向间距固定为 0.5m,作业全程实现连续无断点数据存储,现场终端可以实时输出一维视电阻率曲线,切实满足堤防快速筛查对应的即时解析需求。

2.2 面向堤防工况的硬件专项优化

基于洪泽湖地层电性区间、沿线 40% 信噪比衰减干扰特征,发射、接收、行走控制三类核心硬件开展分层定向改造,每项改造对应降低一类量化检测缺陷。针对深部 30m 地层信号衰减问题,大功率直流发射模块升级双向稳压供电回路与功率放大管组,设备空载至满载区间稳定输出 60.2A 恒定发射电流,同步优化电流关断时序至 $1.2\mu s$,

30m 深度地层感应信号噪声幅值可下降 58%。针对沿线金属护栏、低压线路工频干扰,多匝矩形复合接收线圈增设双层铜网屏蔽结构,线圈支架内置多级减震弹簧,改造后有效接收面积较传统单匝线圈提升 72%,对宽度低于 2m 小型空洞的信号捕捉能力实现幅度提升^[3]。针对 10km/h 匀速巡检时效需求,变频行走控制单元预设标准进行档位,行驶速度波动范围控制在 $\pm 0.3\text{km/h}$,在保障数据采样稳定的基础上切实满足长堤单日巡检里程要求。

2.3 堤防渗漏定量解析诊断算法模型

依托洪泽湖 $8\sim 120\Omega\cdot\text{m}$ 区间分层电性测试数据,分层递进式渗漏处理算法完成搭建,全流程设置多层量化判定阈值,有助于削减人工解译带来的主观误差。算法第一层执行原始数据容错降噪,时序滑动滤波搭配空间邻域平均算法专门过滤车辆震动、金属突变干扰,系统自动剔除偏离均值 3 倍以上的畸变数据,完成原始信号预处理。降噪流程结束后进入第二层电性正演拟合,现场取样标定均质黏土、饱和砂层、埽空洞三类介质专属电阻率区间,搭建标准化电性数据库作为判定基准。依托数据库开展第三层渗漏分级判别,多组原位试样拟合得到视电阻率、含水率、渗透系数关联方程,系统自动圈定低阻异常横向边界与埋深,依照电阻率差值划分三级渗漏风险,直接输出量化隐患坐标,无需人工二次校正操作。

3 电性数值仿真与数字孪生渗流分析体系构建

3.1 洪泽湖堤防地层三维电性仿真定量验证

为规避纯理论参数推导带来 15% 以上仿真偏差,依托大堤险工段实测分层数据搭建长 100m、垂深 35m 三维有限元电性仿真模型,完整还原埽工杂填土、粉质黏土隔水层、饱和透水砂层空间分布形态。模型在 5m、18m、28m 三处埋深设置三组不同宽度渗漏空洞,分别对应浅层、中深层两类型典型隐患赋存状态。两组平行仿真方案形成量化对照基准,方案一采用自研拖曳式瞬变电磁系统,方案二选用市面通用 30A 静态设备,线圈尺寸、采样频率、关断时间等采集参数保持完全统一,依靠仿真剖面量化对比两类设备分辨性能。

仿真输出量化指标直观体现设备差距,30A 静态设备对 18m、28m 深部空洞感应信号衰减超 70%,剖面无闭合低阻轮廓,现场漏判风险极高。自研拖曳式瞬变电磁系统可完整捕捉 3~28m 全部空洞低阻响应,30m 深度地层分层轮廓清晰,无信号失真现象。模拟 10km/h 匀速移动工况后,行驶振动噪声经双层滤波完全消除,数据信噪比满足工程检测标准。三处预设空洞低阻边界与实体几何重合

度达 93.7%,埋深、宽度参数计算误差控制在 0.8m 以内,探测深度、精度、时效三项指标全部达标。基础对照仿真之外,同步搭建枯水期、平水期、汛期三类水位边界联动模型,量化测算渗透荷载变化下土体饱和度、电阻率变化规律,明确各工况渗漏判定阈值,为汛期动态隐患判别提供量化参考依据^[4]。

3.2 堤防数字孪生渗流耦合仿真平台搭建

完成自研拖曳式瞬变电磁系统仿真性能校验、获取地层与渗流通道坐标数据后,三维电性仿真输出剖面作为底层地质约束,融合堤防断面尺寸、地层渗透系数、时序湖水水位多源数据,搭建试点堤段数字孪生虚实映射模型。模型将物探识别渗流通道作为渗流优先计算边界,缓解传统模型人工赋值带来 20% 以上工况偏差^[5]。平台内置饱和-非饱和非线性渗流求解模块,支持动态调整水位、糙率、渗透系数多重边界,完整模拟汛期水位抬升过程中渗透压力、渗流速度演化规律。依托水力梯度计算数值划分三级安全风险,配套防渗注浆、背水导渗、24h 值守三类分级处置预案,形成隐患探测、渗流模拟、风险分级、处置建议完整数字化闭环。平台搭载三维可视化渲染引擎,同步叠加电性剖面、渗流云图、风险色块,直观展示渗流通道空间分布,可弥补二维静态图谱空间展示不足的短板。

3.3 适配洪泽湖堤防的成套检测标准化技术框架

综合自研拖曳式瞬变电磁系统硬件参数、多水位仿真量化结论、数字孪生运行逻辑三类成果,遵循精细化、要素化原则构建本地化检测框架,全部条款依托仿真量化数据支撑,不存在无依据定性描述。框架第一部分为标准化巡检方案,结合病害高发规律设定年度 12 个月全面普查、3 个月汛期专项检测周期,将 10~28m 古砂层堤段、埽工密集区、穿堤构筑物划定一级重点监测区段,规范 10km/h 标准行进速度、0.5m 测点间距、线圈屏蔽全程开启操作细则。框架第二部分为数据解析分级标准,依托多组仿真固化电阻率判定阈值、三级风险量化指标,统一原始数据存储格式、反演步骤、成果归档完整内容。框架第三部分为预警联动机制,打通探测终端、仿真平台、运维管理三方数据接口,实现隐患坐标自动导入、渗流一键计算、预警实时推送、方案同步下发全流程数字化流转,有助于为淮河下游河湖堤防长效监测提供统一可落地执行依据。

4 结论

本文针对洪泽湖多层复合防洪大堤深部渗漏常态化巡检需求,完成自研拖曳式瞬变电磁系统软硬件一体化适配改造,硬件指标基本达到预设量化标准,配套多层降噪

算法可适度削弱堤沿线工频电磁干扰。三维电性对照仿真结果显示,该系统相较于传统静态设备,对0~30m区间各类渗流通道识别精度具备相对优势,参数计算误差可稳定控制在0.8m区间。依托仿真地层数据搭建渗流数字孪生推演平台,能够实现多水位工况下堤防安全风险分级研判,同步形成适配本地堤防的标准化巡检执行框架。整套软硬件一体化技术路径可为同类历史土质堤防渗漏监测提供参考,研究仍存在一定客观局限,后续可围绕设备轻量化、多场耦合仿真方向开展补充完善。

基金项目:江苏省水利科技项目--洪泽湖堤防安全监测关键技术研究应用(合同编号:2022051)

[参考文献]

[1]徐力群,张国琛,马泽锴.土石堤坝隐患探测综合物探技术发展综述[J].地球物理学进展,2022,37(4):1769-1779.

[2]李宗洋,漆泰岳,覃少杰,等.车载瞬变电磁探测近距离含水异常体的仪器选择和线圈布置[J].现代隧道技术,2022,59(1):241-248.

[3]杨榕.基于数字孪生技术的堤防安全监管系统设计[J].水利技术监督,2023,(10):55-58+109.

[4]刘又嘉,卞雷祥,徐展,等.城市浅层地下空间结构小回线瞬变电磁 RDI-SA 高分辨反演成像方法[J].防护工程,2024,46(1):54-61.

[5]刘蔚,徐正玉,杨超,等.拖曳式瞬变电磁法在防空洞精细探测中的应用研究[J].地球物理学进展,2024,39(3):1260-1274.

作者简介:徐铭(1975—),性别:男,户籍:江苏淮阴人,学历:本科,职称:正高级工程师,主要研究方向:主要从事水利工程技术管理工作,江苏省“333高层次人才培养工程”第三层次培养对象。