

# 时间域电磁法在水库除险加固勘察中的应用

文 / 徐 东 海南宏生勘测设计有限公司

**摘要：**水库大坝渗漏是病险水库的常见问题，查明渗漏通道和渗漏原因也是水库除险加固工程勘察难点和困扰问题。随着工程建设和管理要求的不断提升，除险加固工程对精准化防渗堵漏、有的放矢加固、降本增效方面更加注重。本文从方法比选、工作布置、参数选定、数据分析、成果比对、推断结论等方面对时间域电磁法在探贡水库除险加固中的应用进行阐述，本方法在该项目探测效果较好，为防渗加固设计和施工提供了基础依据，可为类似工程提供参考。

**关键词：**大坝渗漏；时间域电磁法；探测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.081

## 引言

水库除险加固勘察的主要任务之一就是查明渗漏通道，分析渗漏原因。钻探作为传统的勘察手段不仅对工艺及作业过程要求严格，成本较高，且会对大坝造成一定损害，工作量布置往往有限，因此物探常作为勘探的重要手段。不同技术方法各有优缺点：高密度电法收集信息量大，采点密度高、采集速度快，但对作业场地要求相对较高（坝线要直，坝轴线两端具有一定延展空间，电极耦合状况良好等）。

### 一、工程概况

海南某水库是位于北黎河上的中型水库，库容 2690 万 m<sup>3</sup>。拦河坝由溢流坝和非溢流坝段组成，溢流坝为浆砌石重力坝，坝高约 15m，长 50m，位于河床中部；两侧非溢流坝均为均质土坝，最大坝高约 20m，坝顶长约 800m。

### 二、工作布置

采用时间域电磁法共布置 14 条测线，测线长度 2440m，点距 1m、2m，物理点 1300 个。其中 TEM1 ~ TEM10 测线布置在土坝坝顶，目的为探测坝体质量、坝体与坝基接触带情况以及土坝与溢洪道挡墙间的接触和渗漏情况等。

### 三、设备及参数选定

时间域电磁法工作原理是利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲电磁场，在一次脉冲电磁场间歇期间，利用不接地线圈或接地电极观测由脉冲电磁场感应的地下涡流产生二次电磁场的空间和时间发布，从而解决相关的工程、地质、水文问题。

采用统一标准的微线圈对偶磁源、高灵敏度磁感应传感器、高速 24 位数据采集卡以及高密度测量技术实现了浅层高精度瞬变电磁勘探。该系统由发射-接收线圈、发射主机、接收主机、连接电缆组成，测点点距为 1m、2m，采样时长 70ms，叠加 30 次，电流脉宽 10ms，发射电流 100A，直径 1m 圆形集成线圈进行探测。

### 四、数据分析与资料解释

将时间域电磁法采集数据导入计算机后，经相应的处理如滤波、平滑、归一化等初步处理后，加入地形资料进行地电介质模型反演，结合区域地质等资料调整反演参数，反演合格后使用专业绘图软件绘制各测线的电阻率等值线图。

根据时间域电磁法对电阻率反演结果，非溢流坝 6 条主要测线电阻率值分布在 100 Ω·m ~ 1250 Ω·m 之间，各条测线的异常分布位置及异常分析情况见下表 1，典型的 TEM-1、TEM-2 线反演等值线见图 1。

表 1 非溢流坝时间域电磁波测线异常分布表

测线编号	测线位置	反演电阻率值 (Ω·m)	异常位置	异常分析
TEM-1 线	左侧非溢流坝段坝顶(靠上游侧)	100 ~ 1000	K0m ~ 10m、K200m ~ 230m、K250m ~ 270m、K505m ~ 530m 段高程 54.5m ~ 40m 处；桩号 K320m ~ 350m、K435m ~ 465m 段高程 54.5m ~ 20m 处存在有低阻且向下延伸异常特征	该测线 0m-10m 处异常(现场调查)为测线周边金属体干扰所引起，其余低阻异常，推测为富水或深部基岩的局部不均匀性所引起。
TEM-2 线	左侧非溢流坝段坝顶(靠下游侧)	100 ~ 1000	K200m-225m 段高程 54.5m-48m 处、K280m-305m 段高程 54.5m-42m 处、K320m-335m 段高程 54.5m-28m 处；K355m-375m、K400m-410m 段高程 54.5m-39m 处、K465m-485m 段高程 54.5m-29m 处、K500m-530m 段高程 54.5m-34m 处存在有低阻往下延伸异常特征	推测为富水或深部基岩的局部不均匀性所引起。
TEM-3 线	右侧非溢流坝段坝顶(靠上游侧)	100 ~ 800	K0m-18m 段高程 54.5m-40m 处、K40m-55m 段高程 54.5m-39m 处、K80m-100m 段高程 54.5m-48 处 m、K182m-192m 段高程 54.5m-44m 处存在有低阻往下延伸异常特征	推测为富水或深部基岩的局部不均匀性所引起。
TEM-4 线	右侧非溢流坝段坝顶(靠下游侧)	100 ~ 1250	K0m-20m 段高程 54.5m-43m 处、K50m-60m、K95m-115m 段高程 54.5m-40m 处、K170m-185m 段高程 54.5m-35m 处存在有低阻往下延伸异常特征	推测为富水或深部基岩的局部不均匀性所引起。

TEM-9 线	左侧非溢流坝段背水坡马道	300 ~ 1100	K100m-130m 段高程 49m-35m 处及 K345m-351m 段高程 46.5m-35m 处存在有低阻往下延伸异常特征	推测为疏松带、富水区域
TEM-10 线	右侧非溢流坝段背水坡马道	100 ~ 1200	K0m-20m 段高程 43.5m-35m 处、K50m-60m 段高程 43.5m-35m 处、K85m-95m 段高程 43.5m-35m 处存在有低阻往下延伸异常特征	推测为疏松带、富水区域

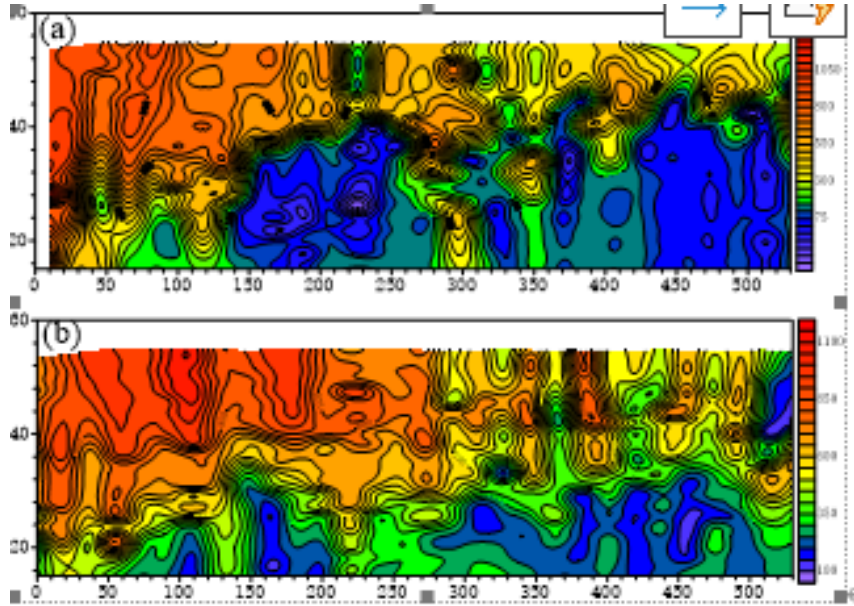


图 1 时间域电磁法反演等值线图

(a) TEM-1 测线；(b) TEM-2 测线  
 非溢流坝与溢流坝挡墙附近 8 条主要测线电阻率值分布位置及异常分析情况见下表 2，典型的 TEM-5、TEM-7、TEM-12、TEM-14 线反演等值线见图 4。  
 分布在  $100 \Omega \cdot m \sim 1600 \Omega \cdot m$  之间，各条测线的异常分

表 2 非溢流坝与溢流坝挡墙时间域电磁波测线异常分布表

测线编号	测线位置	反演电阻率值 ( $\Omega \cdot m$ )	异常位置	异常分析
TEM-5 线	距溢流坝左侧挡墙约 10m 处	200 ~ 1600	K10m-16m 段高程 50m-40m 处、K32m-37m 段高程 44m-34m 处存在有低阻往下延伸异常特征	推测为疏松带、富水区域
TEM-6 线	距溢流坝左侧挡墙约 3m 处	200 ~ 1100	K4m-8m 段高程 52m-40m 处、K30m-37m 段高程 44m-30m 处存在有低阻异常圈闭特征	推测为疏松带、富水区域
TEM-7 线	距溢流坝右侧挡墙约 3m 处	200 ~ 1200	K0m-4m 段高程 54.5m-43m 处存在有低阻往下延伸异常特征，K16m-26m 段高程 43m-36m 处存在一低阻异常圈闭	推测为疏松带、富水区域
TEM-8 线	距溢流坝右侧挡墙约 10m 处	150 ~ 1200	K23m-28m 段高程 42m-36m 处存在一低阻异常圈闭	推测为疏松带、富水区域
TEM-11 线	非溢流坝左侧挡墙墙面距地面 0.5m	10 ~ 1550	K0m-10m 探测深度 0m-14m 存在有低阻往墙后土坝体内部延伸异常特征	推测墙体与填土之间存在疏松带，富水且接触渗漏
TEM-12 线	非溢流坝左侧挡墙墙面距地面 2m	10 ~ 1550	K4m-10m 探测深度 0m-6m 存在有低阻往墙后土坝体内部延伸异常特征	推测墙体与填土之间存在疏松带，富水且接触渗漏
TEM-13 线	非溢流坝右侧挡墙墙面距地面 0.5m	10 ~ 600	K0m-16m 探测深度 0m-14m 存在有低阻往墙后土坝体内部延伸异常特征	推测墙体与填土之间存在疏松带，富水且接触渗漏
TEM-14 线	非溢流坝右侧挡墙墙面距地面 2m	10 ~ 600	K0m-28m 探测深度 0m-12m 存在有低阻向墙后土坝体内部延伸异常特征	推测墙体与填土之间存在疏松带，富水且接触渗漏

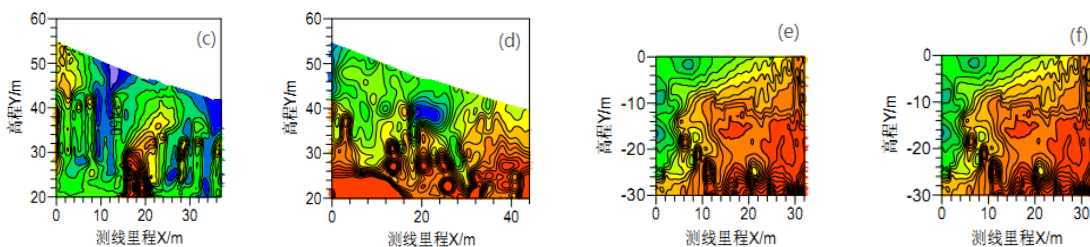


图 4 时间域电磁法反演等值线图

(c) TEM-6 测线；(d) TEM-7 测线；(e) TEM-7 测线；  
(f) TEM-7 测线

(1) 地震映像法：测线 XY-1 ~ 8 线位置与时间域电磁法测线 TEM1 ~ 8 线位置重叠，采样点距 1.0m、2.0m，偏移距 2.0m，采样间隔 0.2ms，采样点数 2048 点，用 24 磅大铁锤敲击铁板做为激发震源。地震映像法采集的数据经连续剖面连接、滤波、增益均衡、截除下部无效信号等处理后，绘制出地震波形剖面图。

(2) 高密度电法：在右侧非溢流坝段背水坡坡面布置 3 条测线，测线间距 8m。正常情况下，土石坝根据

含水量的不同，其电阻率变化范围较大，与相邻的岩土层对比，物性差异特征不固定，以局部低阻为明显标志；渗漏区及花岗岩破碎节理裂隙发育中的水及充填物其电阻率均较低，在本区呈低阻特征；下伏完整花岗岩的电阻率相对较高，在本区呈高阻特征。

利用高密度电阻率法视电阻率等值线图选取典型异常点及异常段进行一维、二维反演，对异常进行必要的强化处理，在充分了解场区的各种物性模型后，结合高密度电阻率法结果，建立异常解释推断模式。经分析推断，各测线异常情况如下表 3 所示。

表 4 非溢流坝高密度电阻率测线异常分布表

测线编号	测线位置	异常位置	异常分析
DF-1 线	右侧非溢流坝背水坡（高程约 54m 近坝顶）	一维反演中，K26m ~ 40m 段高程 40m ~ 30m 处见有电阻率低阻往下延伸特征，该异常与中间低阻层相连接。	浅部高阻特征表现为浅部坝体，中间低阻层特征为坝体及水库水体的综合反映，深部高阻特征主要表现为完整基岩。
DF-2 线	右侧非溢流坝背水坡（高程约 50m）	一维反演中，K0m ~ 10m 段高程 46m ~ 25m、K48m ~ 56m 高程 46m ~ 30m 见有电阻率低阻往下延伸特征，该异常与中间低阻层相连接。在 K140m ~ 160m 高程 45m ~ 30m 串珠状低阻异常。	其余深部低阻异常，推测为基岩的局部不均匀性引起。
DF-3 线	右侧非溢流坝背水坡（高程约 46m 马道处）	一维反演中，K0m ~ 10m 段高程 46m ~ 25m、K48m ~ 56m 高程 46m ~ 30m 见有电阻率低阻往下延伸特征，该异常与中间低阻层相连接。在 K145m ~ 160m 高程 45m ~ 30m 串珠状低阻异常。	其余深部低阻异常，推测为基岩的局部不均匀性引起。

(3) 钻探揭露：在溢流坝两侧对称各布置 2 个钻孔以对该坝段的坝体、坝基岩性及渗透情况进行揭露分析，ZK2 孔（距离溢流坝左侧墙约 8m 处）取芯情况如下：坝体填土以花岗岩风化残积的粘土质砂为主，中粗颗粒较多，上部 0.0 ~ 12.0m 段呈灰黄色、土质略潮湿，钻孔注水试验反应渗透系数平均值为  $5.0 \times 10^{-4}$  cm/s，下部 12.0 ~ 18.1m 段为灰褐色，土质明显湿润，含水量高，靠近底部为深灰、灰黑色，略有腐臭味，土质较疏松，钻孔注水试验反应渗透系数在  $7.5 \times 10^{-4}$  cm/s，部分试段的注水量明显增大渗透系数接近  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s；ZK4 孔（距离溢流坝右侧墙约 8m 处）钻进及揭露情况基本一致。

综合时间域电磁法和其它勘探方法的探测成果，推断出 3 处渗漏异常区域：I 号异常区在 TEM1 测线 K505 ~ 530m、TEM2 测线 K500 ~ 530m、TEM9 测线 K345 ~ 351m 处；II 号异常区在 TEM3 测线 K0 ~ 18m、TEM4 测线 K0 ~ 20m、TEM10 测线 K0 ~ 20m 处；III 号异常区在 TEM3 测线 K40 ~ 55m、TEM4 测线 K50 ~ 60m、TEM10 测线 K50 ~ 60m 处。在 I ~ III 号异常集中分布区在电性介质表现呈现局部不均匀连续变化、地震反射波同相轴错断不连续异常，推测异常渗漏区为网状类侵漫。在 II、III 号异常区，电阻率呈低阻异常特征，波速呈低频强反射，推测该异常为富水渗漏区；探测发现溢洪道

两侧墙体与坝体之间异常相对更为明显，推测该接触部位渗漏更为集中。

### 结语

采用时间域电磁法对水库大坝进行渗漏隐患探测时设备操作简捷灵活，数据采集丰富，解决了折线坝段物探不易布线问题，经多方法比对和钻探验证，准确查明了渗漏范围，具有较好探测效果，为后期除险加固勘察、设计和施工提供了可靠依据。

### 参考文献

- [1] 牛之琏. 时间域电磁法原理 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- [2] 程志平. 电法勘探教程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [3] 扈本娜. 瞬变电磁法在水库大坝场地勘察中的应用 [J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1642-1651.
- [4] 姚纪华, 罗仕军, 宋文杰, 等. 综合物探在水库渗漏探测中的应用 [J]. 物探与化探, 2020, 44(2): 456-462.
- [5] 张建清, 徐磊, 李鹏, 等. 2018. 综合物探技术在大坝渗漏探测中的试验研究, 地球物理学进展, 33(1): 0432-0440.
- [6] 单娜琳, 程志平, 丁彦礼. 地震映像数据的时频分析方法及应用 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1740-1745.