

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2025.01.016

# 综合物探方法在某抽水蓄能电站库址勘察中的应用对比

习肖伟,贾金典,韩艳军,张雷,要悦稳

(中国冶金地质总局地球物理勘查院,河北保定 071051)

**摘要:** 为解决抽水蓄能电站预可行性研究阶段库址勘察中遇到的不同工程地质问题,采用高密度电阻率法、音频大地电磁法(AMT)、微动探测等3种物探方法,对库区同1条剖面进行探测,分析对比探测结果,并评判其有效性。对比发现:高密度电法可以弥补AMT在浅部横向分辨率不高的不足,该2种方法配合使用能取得更好的探测效果;AMT对于探明深部可能存在的断层、破碎带或其他不良地质体有着绝对的优势;微动探测在抽水蓄能电站库址选址勘察中,能够准确区分基岩层,可选择性地用于查明上下水库坝轴线、上下水库进出水口处覆盖层厚度、基岩面分布形态并进行风化分层。

**关键词:** 抽水蓄能电站库址勘察;高密度电阻率法;音频大地电磁法(AMT);微动探测

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A

## 0 引言

在我国“碳达峰、碳中和”目标下,加快抽水蓄能电站建设成为构建以新能源为主体的新型电力系统的迫切要求。抽水蓄能电站主要建筑物由上水库、下水库、厂道系统(地下厂房、水道)等部分组成<sup>[1]</sup>。为了储蓄足够的势能进行发电,抽水蓄能电站需要较大的水头差,通常在复杂地形地质条件下筑坝成库,其工程往往要跨越各种形态地貌,穿过岩性繁杂的地层,涉及到不同规模、不同形状特征的断裂构造及复杂多变的地下水水文地质结构<sup>[2]</sup>。为此,选取何种物探方法以解决抽水蓄能电站预可行性研究阶段遇到的不同工程地质问题尤为关键。

高密度电阻率法作为一种阵列勘察方法,具有信息量大、观测精度高、生产效率高特点,被广泛应用于水库坝址工程勘察。黄志全等<sup>[3]</sup>将高密度电阻率法和瞬变电磁法用于河南五岳抽水蓄能电站上

水库花岗岩岩体结构异常区探测,为水库的渗漏评价和防渗工程设计提供了参考依据。音频大地电磁测深法(AMT)通过地面上单点观测天然交变电磁场互相垂直的5个分量( $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ ),分析研究地面波阻抗随频率的变化,以此探测地下岩石电性随深度的分布规律。因AMT探测深度大、装置体积小、数据采集方法简单、野外工作成本较低等特点,常被用来探测库坝勘察中地下深部的断裂构造、破碎带、软弱层带位置等问题。何昕欣等<sup>[4]</sup>将AMT应用于丰宁抽水蓄能电站水道系统及地下厂房区地下水特征及分布规律的研究,对地下厂房的位置提出了合理性建议。近些年来,我国学者也在微动理论及应用研究方面开展了大量工作,将微动探测技术应用于库坝检测领域已取得实用性成果。王玉威等<sup>[5]</sup>将微动探测技术应用于广西田东县抽水蓄能电站大坝选址勘测,在地层勘察及破碎、断层等不良地质体探测中取得较好的效果。

单一物探方法通常具有很大的不确定性,并且针对不同的工程地质问题,不同物探方法所体现出

收稿日期: 2024-08-28; 改回日期: 2025-01-10; 责任编辑: 沈名星

作者简介: 习肖伟(1988—),男,工程师,2015年毕业于中国地质大学(北京),硕士研究生,主要从事地球物理勘查及相关研究工作。E-mail: xxw0801@163.com

通信作者: 贾金典(1977—),男,高级工程师,2011年毕业于中国地质大学(武汉),主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: 4412887@qq.com

的优势也不尽相同。因此,本着因地制宜的原则,本文以某抽水蓄能电站预可行性研究阶段4线剖面作为试验线,对高密度电阻率法、音频大地电磁测深法(AMT)、微动探测等3种方法进行了对比研究。

## 1 地质概况及地球物理条件

### 1.1 地质概况

#### 1.1.1 地形地貌

工程区位于东秦岭外方山系东部。区内地形切割强烈,地形起伏大。总体地势西高东低,上、下水库地表高差在400 m以上,其中上水库与下水库之间最高峰高程达1428.3 m,为中山区侵蚀地貌。

电站上水库集雨面积1 km<sup>2</sup>,库盆范围内库底高差100 m以内,近沟底地形坡度11°~16°,沿库盆四周发育有数条规模较大的冲沟,均为季节性冲沟。两岸山体雄厚,库周没有低于正常蓄水位高程的低矮垭口,仅右岸坝肩附近山体略单薄,在正常蓄水位1000.00 m高程时,右岸坝肩附近山体最小厚度90 m。坝址及水库区河谷呈窄“U”型,山势陡峻,两岸坡度30°~45°,局部可达60°,地形封闭条件好。植被茂密,以低矮灌木和乔木为主。

下水库集雨面积2.5 km<sup>2</sup>,库盆范围内库底高差在60 m以内,近沟底地形坡度0°~8°,沿库盆四周发育有多条规模较大的冲沟,均为季节性冲沟。水库有河流经过,为季节性流水。河谷宽缓,两岸岸坡坡度15°~40°,库内地形不规整。库周地表分水岭高程>600 m,地形封闭条件好,无低于正常蓄水位高程的低矮垭口,两岸山脊高程为610~1010 m,库周山体较宽厚,仅两岸坝肩附近山体较单薄,正常蓄水位时,左岸坝肩山体最小厚度约60 m,右岸坝肩山体最小厚度约110 m。库坝区植被茂密,以低矮的灌木和乔木为主。

#### 1.1.2 地层岩性

区域地质资料显示工区地层从老至新主要有(图1):太古界(Ar)、中上元古界(Pt<sub>2</sub>、Pt<sub>3</sub>)及古生界寒武系(Є)、少量第三系(E)、第四系(Q)及侵入岩。工程区内主要出露地层为中元古界熊耳群中组,岩性主要为英安流纹岩、英安岩,玄武安山岩夹英安流纹岩、凝灰岩等;侵入岩主要为王屋山期侵入岩,岩性主要为花岗闪长岩、石英闪长岩、闪长岩、正长闪长岩、石英二长岩。另外,第四系松散堆积物在工程区广泛分布,主要有残坡积层(Q<sup>cdl</sup>)、冲洪积层

(Q<sup>pal</sup>)、崩坡积层(Q<sup>codl</sup>)等。其中,残坡积物(Q<sup>cdl</sup>)主要为深褐色粉砂质黏土、粉砂土夹碎块石,分布于工程区山脊及缓坡地带。冲洪积物(Q<sup>pal</sup>)多具二元结构,上部为灰褐色砂壤土间夹残坡积物,下部为灰褐色含泥砂砾石,主要分布于上、下水库工程区冲沟、河床及两岸阶地。崩坡积物(Q<sup>codl</sup>)主要分布于上、下水库之间山坡、冲沟地带,以碎块石为主。

#### 1.1.3 地质构造

据已有地质及钻孔、物探资料,工程区上水库见断层4条,下水库见断层11条,输水发电系统见断层3条。按断层走向可分NE向、NNE向、NEE向、EW向、SN向、NNW向、NW向、NWW向等8组,其中以NE向和EW向断层较发育。工程区内节理裂隙较发育,以陡倾角为主,倾角大多>60°,发育少量中缓倾角节理。节理规模一般较小,延伸长度一般<5 m,少数在5 m以上,节理间距一般0.3~2 m;岩体浅表层节理张开宽度一般<20 mm,以风化碎屑夹泥充填为主,少数石英脉充填或无充填,部分节理面附钙膜或铁锰质浸染物。

### 1.2 地球物理条件

根据工区地质情况,对本区出露岩石电性参数进行了测定,测区出露的岩石电阻率按出露岩体(英安岩、花岗闪长岩)→弱风化层(英安岩、花岗闪长岩)→强风化层→第四系松散堆积物(粉砂质黏土、粉砂土、碎石等)排序梯次降低,英安岩、花岗闪长岩

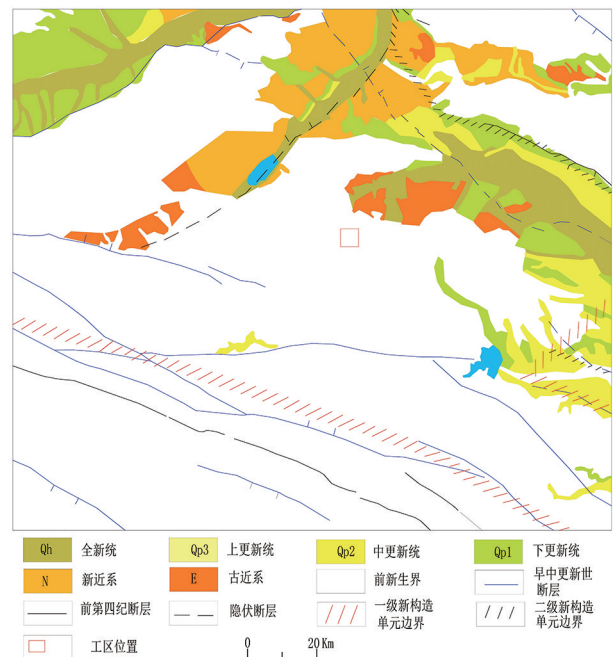


图1 区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of working area

电阻率值最高,可达  $2000 \sim 3000 \Omega \cdot \text{m}$ ,粉砂质黏土、粉砂土、碎石等电阻率值最低,约  $5 \sim 60 \Omega \cdot \text{m}$ 。根据本次测定的物性数据及以往工作经验,中元古界熊耳群中组与王屋山期侵入岩地层表现为高阻,岩石破碎带、节理裂隙发育区表现为相对中低阻,第四系松散堆积物地层表现为低阻,各组岩石电性差异比较明显。因此,本区具备大地电磁法划分层位,圈出破碎带、节理裂隙发育等不利部位的地球物理前提。

## 2 工作方法与技术

本次物探工作的某抽水蓄能电站为常规电站,上、下水库均为新建,因此本次工程勘察要解决的问题有 3 个:一是查明上下水库坝基及两岸防渗范围内强透水带的分布情况;二是查明上下水库坝轴线、上下水库进出水口处覆盖层厚度、基岩面分布形态并进行风化分层;三是探明剖面沿线可能存在的断层、破碎带,或其他不良地质体。据勘察区地质、水文地质条件,为弄清针对上述问题采取物探方法的有效性,在库盆中部 4 线上布置了高密度电阻率法、音频大地电磁法(AMT)和微动测量等 3 种物探方法,剖面方向均为  $305^\circ$ (图 2)。

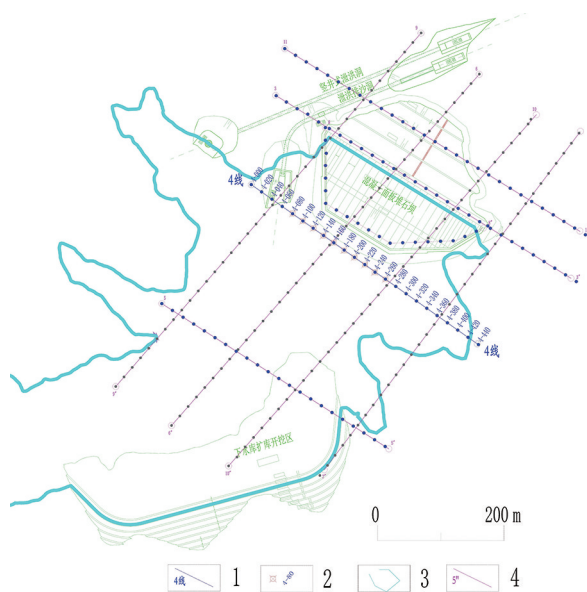


图 2 物探工作平面布置图

Fig. 2 Plan of geophysical work layout

1. 高密度电阻率剖面、AMT 剖面及线号;
2. 微动点位及点号; 3. 库区范围; 4. 其他剖面及线号

### 2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法通过一次布极来完成垂直和水平二维勘探过程,是以综合了电剖面 and 电测深两者优点的高密度电法。该观测系统包含数据的采集和数据处理两方面内容。现场测量时,只需要把所有的电极放在一个特定间隔的测点上。测量点间距一般设置为  $1 \sim 10 \text{ m}$ ,测量信号通过电极转换开关进入计算机工程测试仪器,把测量结果按次序存储到随机存储器中,并把数据回放到计算机中,就可以根据给定的程序来处理数据。

本次高密度电阻率法共布设剖面  $400 \text{ m}$ (4 线, -155 点—590 点),电极距  $5 \text{ m}$ ,采用温纳施伦贝尔装置采集数据,野外工作采用 N2 智能高密度电法测量系统,系统由 N2 主机、Mini-10 开关、高密度线缆(10 道/根)组成。数据处理采用 Res2Dinv 反演软件,首先将同一剖面的各排列数据拼接成一个完整的剖面数据,然后剔除突变点,再用最小二乘法进行反演。

### 2.2 音频大地电磁法(AMT)

音频大地电磁法是通过观测由远程天电引起的天然平面电磁波信号以确定地下的电阻率值的方法。采用音频大地电磁法主要目的是探明剖面沿线可能存在的断层、破碎带,或其他不良地质体。本次 AMT 法工作使用美国 Crystal Globe 公司生产的 Aether 系统采集资料,观测频率范围为  $0.1 \sim 10 \text{ KHz}$ ,采用 4 个电极测量,即 2 个电极组成一对电偶极子 MN(长度  $20 \text{ m}$ ),其中,测量与测线同向的 MN(X-Dipole 电偶极子)电位差并计算得到电场水平分量  $E_x$ ;测量垂直测线的 MN(Y-Dipole 电偶极子)电位差并计算得到  $E_y$ 。Aether 主机放在两组电偶极子的中心,磁探头与 Aether 主机距离大于  $5 \text{ m}$ , $H_x$  磁探头和  $H_y$  磁探头相互垂直。电极布极方式主要为“+”字形。

本次 AMT 布设剖面  $400 \text{ m}$ (4 线, 0 - 400 点)与高密度剖面重合,点距为  $20 \text{ m}$ ,采集时间长度设定为  $35 \text{ min}$ ,采样率为  $96000 \text{ Hz}$ 。数据预处理后,采用 ProMT、SCS2d 系列软件进行资料后续处理。在处理过程中,首先对数据进行去噪及静态校正等处理,然后进行一维及二维反演成像。

### 2.3 微动探测

微动探测提取频散曲线主要有空间自相关法(SPAC)、频率-波数法(F-K),后分别对 SPAC、F-K 方法进行改进,提出扩展的空间自相关法(ES-PAC)、高分辨率频率-波数谱法。研究认为:SPAC

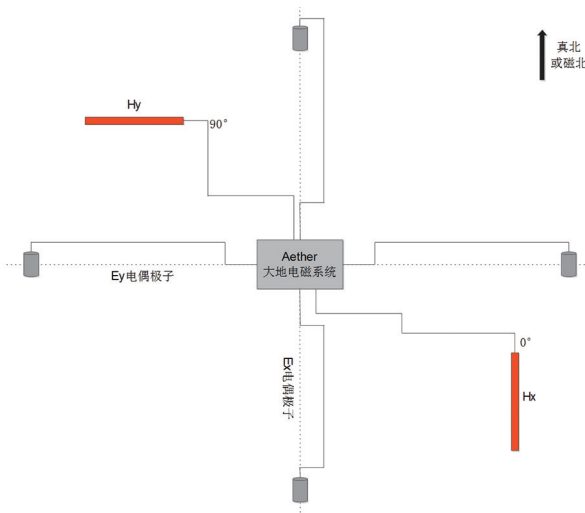


图3 音频大地电磁 (AMT) 工作示意图

Fig. 3 AMT working diagram

方法相较于 F-K 方法分辨率高,但是对阵列要求高,施工环境要求高,适用于场地平整无干扰的环境;F-K 方法分辨率与台阵仪器数呈正相关,且对阵列要求低,对各种施工环境适应性较强。

本次开展微动探测的区域为典型山谷地形,所选 4 线测线为一条横跨山谷的测线,测线两侧山势较陡无法找到摆下整个台阵的平面,因此,微动剖面仅覆盖测线中部一段,即 4 线 8—220 点。微动采取线性台阵单点观测,道间距 3 m,每个测点布置 11 个检波器,观测时长 30 min,最终采用频率-波数法 (F-K) 提取频散曲线。

### 3 成果分析

从 4 线高密度电法电阻率反演断面图 (图 4) 上可见,反演结果中包含了丰富的浅表地质信息,反演深度在 55 m。地表 (0~20 m) 为变化稳定的低阻带,反演电阻率一般在  $0\sim 100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,是第四系和岩石风化物的反映。在点号 0—80 范围内有数个高阻体,并且和中部的的高阻体相连,是致密岩体在地表出露的反映。在点号 0—50 范围中深部存在多个低阻区域,左侧低阻区向下延伸没有闭合,考虑到探测深度较浅,单从高密度电法反演断面图看暂不清楚深部基岩情况,推测该区域节理密集带发育或有断裂存在。在点号 160—180 范围下部,显示为向下延伸的低阻带,贯穿整个剖面,推断该处为断层  $F_1$  的反映。在点号 200—440 范围中下部,为明显的高阻

区,反演电阻率  $> 360\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推断为完整基岩的反映。

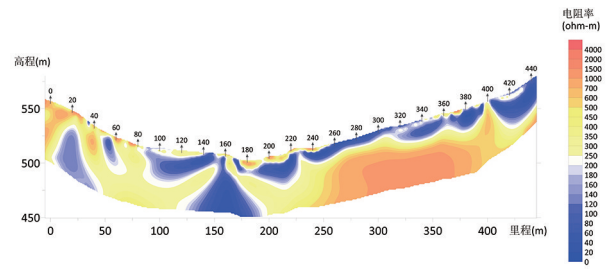


图4 4线高密度电法电阻率反演断面图

Fig. 4 High density electrical resistivity inversion cross-section of line 4

从 AMT 电阻率反演断面图上看,电阻率值由浅至深逐渐增大,有效反演深度超 300 m。地表主要为粉砂质黏土、粉砂土夹碎块石,从电阻率断面特征推测该区域覆盖层厚度为 3.2~44 m,属于变化稳定的低阻带,视电阻率  $0\sim 120\ \Omega\cdot\text{m}$ ;强风化带下限深度 4.2~50 m,视电阻率值范围小于  $200\ \Omega\cdot\text{m}$ ;完整基岩视电阻率大于  $360\ \Omega\cdot\text{m}$ 。剖面在点号 170 及 260 附近,电阻率相对两侧呈明显低阻显示,推测存在断层,为  $F_1$ 、 $F_2$  断层,其中  $F_1$  倾向 NW,在该剖面倾角约  $72^\circ$ ;  $F_2$  倾向 ES,倾角约  $73^\circ$ 。断层影响范围内岩石破碎、裂隙发育。在 20—110 点号段电阻率值相对较低,推测岩石较破碎,为节理裂隙发育区。

从获得的微动探测剖面结果来看,表现出较好的分层效果。剖面可分为 3 层:第一层为覆盖层,主要为粉砂质黏土、粉砂土夹碎块石等,视横波速度  $100\sim 300\ \text{m/s}$ ,埋深  $0\sim 15\ \text{m}$ ;第二层为强风化层,主要为砂岩,波速  $300\sim 1100\ \text{m/s}$ ,埋深  $10\sim 50\ \text{m}$ ;下为基岩。低速异常有 2 处:一是点号 80—140 之

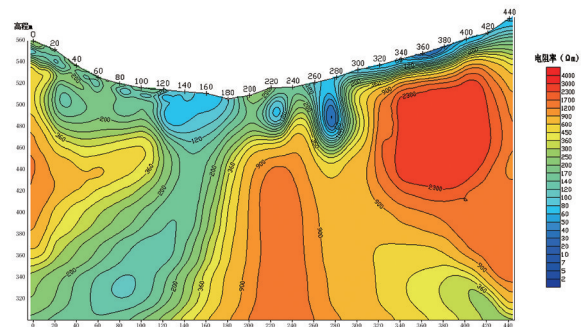


图5 4线音频大地电磁 (AMT) 电阻率反演断面图

Fig. 5 AMT resistivity inversion cross-section of line 4

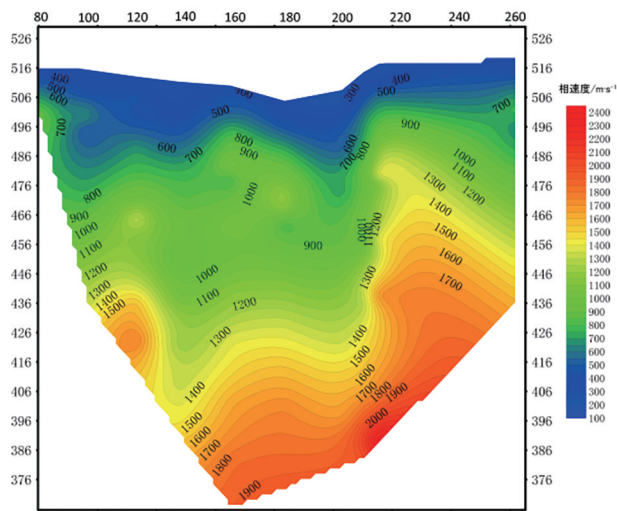


图 6 4 线(80—260 点)微动测量剖面

Fig. 6 Microtremor Survey profile from point 80-260 along line 4

间,深度 10~40 m 区域内,推测该处异常因岩层破碎或裂隙发育引起;二是点号 180 下方,该处低速异常向下延伸,且向北西倾斜,倾角 75°左右,推测此处存在断层  $F_1$ 。

综合分析 3 种物探方法的反演结果为:①从勘探有效性看,3 种物探方法在断层识别和岩体圈定方面都有准确的反映,比如均对点号 160—180 区域的  $F_1$  断层有明显的反映,对点号 80—140 浅部的节理密集带也均有反映。②从勘探深度看,AMT 具有较大的纵向测量深度,这是高密度电法和微动探测不具备的。更大的纵向测量深度可以区分浅部干扰和延伸至深部的异常,比如从 AMT 电阻率反演断面图可以明确判断点号 0—50 区域中深部的低阻区仅存在于浅部,不可能是主断层位置。③从浅地表横向分辨率看,高密度电法可以更精确地刻画断层位置及高低阻界线,比如高密度电法可以把断层  $F_1$  在地表的出露位置锁定在点号 160—180 之间,而 AMT 反演结果只能将出露位置定在点号 120—200 之间,微动探测只能整体考虑断裂的趋势。④从

地层划分效果上看,微动探测结果没有高密度电法和 AMT 在浅表反映出来的低阻圈闭异常,却对大套地层做出了清晰地划分。

## 4 结论

(1)高密度电法可以弥补 AMT 在浅部横向分辨率不高的不足,2 种方法配合使用能取得更好的探测效果。

(2)抽水蓄能电站的主体建筑多为深埋藏的地下工程,从勘探深度上考虑,AMT 对于探明可能存在的断层、破碎带或其他不良地质体有着绝对的优势。

(3)微动探测在抽水蓄能电站库坝选址勘察中,能够准确区分基覆层,并实现对节理密集裂隙带和断裂构造等不良地质体的精细探测,对选址综合评价及安全建设具有重要意义。

(4)微动探测布设台阵易受地形限制,而抽水蓄能电站多建于复杂地质条件的山区,故可选择性地应用于查明上下水库坝轴线、上下水库进出水口处覆盖层厚度、基岩面分布形态并进行风化分层等问题。

## 参考文献:

- [1] 钱程,刘普胜. 阳江抽水蓄能电站上水库渗漏工程地质评价[J]. 河南水利与南水北调, 2022.
- [2] 常伟,钱世龙. 抽水蓄能电站工程地质勘察的物探对策[J]. 物探与化探, 2001. DOI:CNKI:SUN:WTYH. 0. 2001-04-013.
- [3] 黄志全,徐洋洋,袁广祥,等. 基于高密度电阻率法和瞬变电磁法的花岗岩岩体结构探测[J]. 华北水利水电学院学报, 2021, 42(6): 66-72.
- [4] 何昕欣,陈鹏,乔勇,等. EH-4 电磁成像系统在丰宁抽水蓄能电站探测中的应用[J]. 华夏地理, 2015(6): 167-170. DOI:10.3969/j. issn. 1673-6974. 2015. 06. 095.
- [5] 王玉威,徐子桥. 微动在广西田东县抽水蓄能电站大坝选址勘察中的应用研究[J]. 地下水, 2023, 45(3): 293-295.

## Application of Integrated Geophysical Exploration Method to a pumped storage power station

XI Xiaowei, JIA Jindian, HAN Yanjun, ZHANG Lei, YAO Yuewen

*(Geophysical Exploration Academy of China Metallurgical Geology Bureau, Baoding 071051, Hebei province, China)*

**Abstract:** In order to solve different engineering geological problems encountered during the pre-feasibility study stage of pumped storage power stations high-density resistivity, AMT, and Microtremor Survey are integrated to explore the same profile of the reservoir area and the results compared and analyzed, and their effectiveness evaluated showing that high-density electrical method can compensate for the low lateral resolution of AMT at shallow depth. Combination of the two methods can achieve better results. AMT has an absolute advantage in identifying potential faults, fractured zones, or other unfavorable geological bodies to depth. Microtremor Survey can accurately distinguish the foundation cover layer in the site selection survey of pumped storage power station dams, determine the axis of the upper and lower reservoir dams selectively and the thickness of the cover layer at the inlet and outlet of the upper and lower reservoirs, morphological distribution of the bedrock surface and the weathering layer.

**Key Words:** site survey of pumped storage power station; high-density resistivity method; AMT; Microtremor Survey