

基于高密度电法的抽水蓄能电站地下岩体结构探测

李 勇, 王佳龙, 黄小林

(湖南联智科技股份有限公司, 长沙 410200)

摘要: 针对抽水蓄能电站地下岩体结构探测存在水下、地形复杂多变、对探测深度和分辨率要求较高等问题, 提出了一种适应性强、稳定性高、成果信息丰富, 可满足大坝地下岩体结构探测深度和分辨率要求的一种高密度电阻率探测方法。该方法对地下低阻异常具有较高的灵敏度, 在探明地下破碎发育带和断层等构造优势显著。通过对西藏永木抽水蓄能电站上水库布设的3条高密度电法剖面进行分析, 推断该地段基覆界线、破碎带、断层等分布情况, 结合现场钻探验证结果, 发现高密度电法反演解译结果与钻孔资料吻合较好, 为下一步进行全区断裂划分、基覆界线确认和综合地质解释奠定了基础。结果表明高密度电法在查明抽水蓄能电站地下岩体结构的可行性和有效性。

关键词: 抽水蓄能电站; 高密度电法; 低阻异常; 岩体结构; 综合地质解释

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)10-0252-06

近年来, 随着生态文明建设的大力推动, 国家发电的形式和组成结构发展迅猛, 在传统的煤炭发电基础上, 环保新能源发电得到大力发展。而在以新能源为主体的新型电力系统中, 抽水蓄能发电以其独特的优势在新能源发电发展中有着重大潜力, 它是利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库, 在电力负荷高峰期再放水至下水库发电的水电站, 可将电网负荷低时的多余电能, 转变为电网高峰时期的高价值电能, 还适于调频、调相, 稳定电力系统的周波和电压, 可为事故的发生备用, 还可提高系统中火电站和核电站的效率。我国抽水蓄能电站的建设起步较晚, 但由于后发效应, 起点却较高, 近年建设的几座大型抽水蓄能电站技术已处于世界先进水平。在“十四五”可再生能源发展规划提出, 到2025年, 可再生能源年发电量达到3.3万亿kWh左右, 所以, 抽水蓄能电站的建设不可或缺, 是目前国家电网智能、多元化、清洁化、低碳化发展的重要组成部分^[1-2]。

抽水蓄能电站需要有特殊的地形条件才能建设, 需要两个临近且具有海拔落差的水库才能实现抽水蓄能。本研究区位于西藏山南市桑日县与加查县境内, 受西藏永木抽水蓄能电站项目部的委托, 对上水库建设的地下岩体结构进行前期的勘

探, 主要是利用高密度电法^[3-12]探明测区地段基覆界线、裂隙发育带、破碎带、断层等构造带分布等, 借助钻探进一步验证和系统分析地下岩性特征, 并应用到测区所有高密度测线剖面, 实现由点到面、从已知推导未知的科学、可靠、高效方法, 进而对全区进行断裂划分、基覆界线确认和综合地质解释, 为今后在类似地区抽水蓄能电站地下岩性探测进行地质解释提供依据。

1 工区地质背景与地球物理特征

1.1 地层

工程区位于青藏高原中南部高山深谷区, 属滇藏地层大区, 位于冈底斯-念青唐古拉地层区南部。区域中沉积岩、岩浆岩、变质岩均有出露, 其中以岩浆岩、变质岩相对发育, 未变质的沉积岩相对较少, 地层岩性复杂。研究区以喜山期(E₂R)侵入的黑云母花岗岩闪长岩为主, 局部穿插黑云母石英闪长岩岩脉, 主要为雅鲁藏布江左岸冈底斯-念青唐古拉地层区南部岩浆岩。第四系冲洪积层多为冲洪积混合土漂卵石, 厚度为5~20 m。

1.2 构造

工区在大地构造上位于拉萨地块南部边缘, 靠近雅鲁藏布江缝合带, 区域内断裂发育, 主要为近东西向和近南北向, 次为北东、北西西向。近东西

收稿日期: 2024-03-12

作者简介: 李勇(1978—), 男, 湖南怀化人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为公路水运检测与桥梁隧道质量安全与耐久性; 通信作者王佳龙(1991—), 男, 湖南长沙人, 硕士, 工程师, 研究方向为物探方法在工程检测和水文地质勘查中的应用; 黄小林(1981—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 研究方向为公路水运检测应用。

向断裂一般规模较大,有些具深断裂性质,多为逆冲、逆走滑断层,最新活动时期多在第四纪早、中期。北东、北西西向断裂单条断裂规模一般不大。工程区属于山区地形,两边高,中间低,地形坡度为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,区内未见较大软弱结构面,节理、裂隙发育,存在局部岩质边坡节理发育,以北北东向为主。抽水蓄能电站上水库坝体地形及测线布置如图 1 所示。

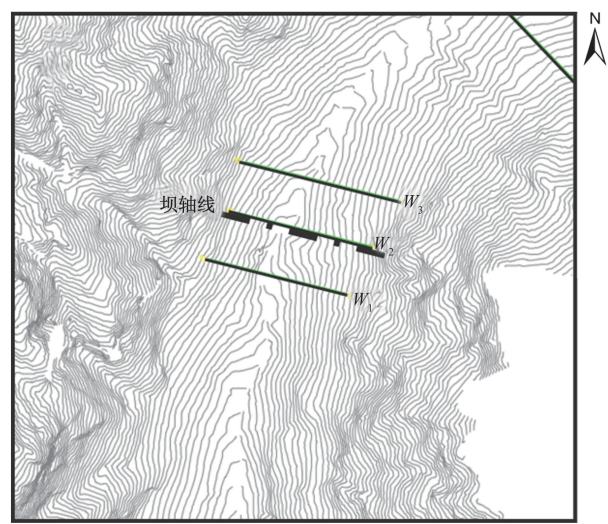


图 1 上水库坝体地形及测线布置

1.3 地球物理特征

研究区地层大致可以分为上下两层,上部为第四系冲洪积层,河床部位多为冲洪积混合土漂卵石,两岸崩坡积体发育,下部为岩基,主要是黑云母花岗闪长岩。根据收集的区电性资料并结合现场实测,详细结果如表 1 所示。河床冲洪积堆积体电阻率在 $200\sim 720\ \Omega\cdot\text{m}$ 变化,为相对中低阻,两岸风化崩坡积体电阻率在 $900\sim 3\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 变化,为相对中阻;基岩岩体电阻率在 $3\ 000\sim 10\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 变化,为相对高阻;区内断层、节理、裂隙发育带易充水,电阻率在 $50\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 变化,与周围存在明显电阻率差异,呈现相对低阻异常圈闭特征,这些高阻中的条带状或团状低阻带是本次研究的重点,也是研究区具有进行高密度电法勘探的地球物理前提条件。

表 1 研究区岩石电性参数

地层或岩体	岩性	电阻率值/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	几何平均值/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	标本数/ 个
第四系(Q) 岩体	冲洪积物	200~720	418	10
	花岗闪长岩	3 000~10 000	5 280	17
	河水	10~100		

2 工作方法与数据处理

2.1 高密度电法工作原理

高密度电法和常规电阻率法一样,以岩土体电性差异为基础,采用点阵式向大地发射稳定电流场,通过接收电极间的电位差信息,再根据相应的装置系数求得各个测点的视电阻率值,在各向同性介质中,测量视电阻率表达式为

$$\rho_s = \frac{K\Delta V}{I} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为视电阻率值, $\Omega\cdot\text{m}$, K 为电极装置系数; ΔV 为测量电极 M、N 间的电位差,mV; I 为供电电极 A、B 间的电流,mA。

高密度电法测量系统采用自动控制系统和大规模集成电路,通过密集采样观测,获取地下介质视电阻率值或者梯度变化规律,从而达到对地下地电结构、构造的解释。高密度电法在进行测量时,随着间隔系数 n 的增大,四个电极之间的间距也均匀增加,如温纳装置,当 $AM=MN=NB$ 为一个电极间距,A、M、N、B 逐点同时向右移动,得到第一条剖面线;接着 AM 、 MN 、 NB 增大一个电极间距,A、M、N、B 逐点同时向右移动,得到另一条剖面线;这样不断扫描测量下去,最终采集得到的数据体为一个倒梯形断面,高密度电法工作原理图如图 2 所示。

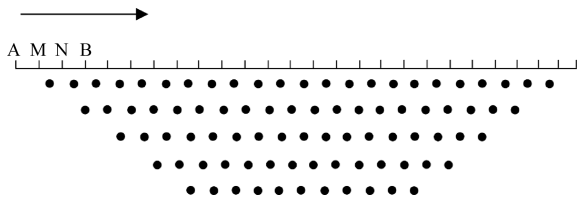


图 2 高密度电法工作原理

2.2 高密度电法野外工作方法

在新的工区开展工作前,需先在工区内进行观测装置及参数选择试验,达到设计要求后才能投入生产。根据设计和试验结果,使用重庆奔腾数控技术研制的 WGMD-4 型超级高密度电法系统开展数据采集工作,一次布设电极 90 根,电极间距为 5 m,选用温纳装置,供电时间为 200 ms,最大供电电压为 144 V,采用滚动测量的方式延长剖面长度。目标勘探深度 80 m 以浅,系统检查工作量不低于总工作量的 3%。

在实际地质调查基础上,根据该抽水蓄能电站上水库坝轴线布置设计方案,结合地形条件,在上水库坝轴线上游布设测线 W_1 、坝轴线下游布设测线 W_3 和沿坝轴线布设测线 W_2 ,共 3 条测线,测线

方向为北西向,测线间距离约 100 m (图 1),其中 W_1 剖面长为 360 m,测量点数为 73 个; W_3 剖面长为 380 m,测量点数为 77 个; W_2 剖面长为 400 m,测量点数为 81 个。

2.3 高密度电法数据处理

高密度电阻率法数据处理是对野外采集的数据使用 RES2DINV 软件进行反演计算、分析、成图,主要包括数据预处理、地形校正、正演模拟和反演计算。高密度电法数据处理流程如图 3 所示。

(1)数据预处理:包括对野外采集回来的原始数据进行初步成图分析,剔除畸变点,由于点击接触不好或其他各方面的干扰因素,可能常使数据断面出现一些虚假点或突变点,忽大忽小,与相邻电阻率相比有数十倍甚至更大的差距,进而造成电阻率拟断面图的虚假异常,难以对其进行准确解释。

(2)地形校正:加载测线上所有测点的平面和高程坐标,将实测剖面校正至真实的状态,有利于分析浅层因地形或干扰等因素导致电性不均匀或三维状态高频反应强烈造成静位移现象引起的电性异常。

(3)正演模拟:正演计算主要是通过数值模拟的方法,求解稳定电流场,最终获得各节点的电位值,进而求得与具体装置形式相对应的视电阻率值,

以表征稳定电流场的空间分布,正演模拟是合理解译反演成果的基础。

(4)反演计算:反演计算是地球中最核心、最普遍的问题,其目的是根据地面上的观测信号推测地球内部与信号有关部位的物理状态。高密度电法反演计算是根据每个测点的视电阻率值进行迭代,如果反演迭代闭合差合格且数据拟合程度高,则将反演结果进行成果图件输出;如果反演迭代闭合差不合格,则返回数据预处理阶段,进行数据重新编辑再反演,一直循环到数据合格为止。

3 综合地质解释与钻探验证

3.1 综合地质解释

图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)分别为上水库高密度 W_1 测线、 W_3 测线和 W_2 测线反演电阻率二维剖面。可以看出,沿剖面纵向方向上,3 条剖面视电阻率均呈现中低阻—高阻变化趋势;沿剖面横向方向上,3 条剖面视电阻率均呈现两边高,中间低的变化趋势,局部出现圈闭的低阻体,在 W_1 和 W_3 剖面上的 160~220 号测点范围(河床)出现了圈闭的团状低阻体异常, W_2 剖面在河床底部视电阻率为中高阻,与两岸高阻体存在电性差异,且在右岸 250~330 号测点范围 3 条剖面均出现了条带状或者团状的中低阻异常。

因此,本文以地质背景资料为基础,结合相邻各条测线的反演电阻率剖面具有地电剖面形态相似性和反映地质构造类似性特征,以沿坝轴线布设的 W_2 测线反演成果剖面反映的电性层分布特征为主要依据,开展坝址区综合地质剖面推断解释[图 4(d)]。根据图 4(c)反演成果,推断剖面最上部显示的中低阻体应属第四系,主要岩性冲洪积混合土漂卵石和崩坡积碎石体,电阻率为 $n \times 100 \Omega \cdot m$ ($n=1,2,3,\dots,9$),厚度为 5~20 m,为第一层;下部显示的高阻体为基岩岩体,主要岩性为黑云母花岗闪长岩,电阻率为 $n \times 1\,000 \Omega \cdot m$,为第二层;根据高密度反演剖面的电阻率值相对大小、不连续、低阻异常带等特征,并结合研究区区域地质背景资料,初步推测断了 1 条断裂 F_1 和 2 处破碎带。

(1) F_1 断裂。 F_1 位于测线(北西向)的中部,河床南侧,逆断层,走向为北北东,倾向北东,倾角约 50° 。该断裂在所经过的 3 条北西向测线上均有低电阻率异常带和电阻率值不连续特征反应,在地质上主要为构造运动抬升发育形成。

(2)破碎带 A。该破碎带位于测线中部,河床顶面 15 m 以深,整体呈近东西向展布,平面形态呈圈

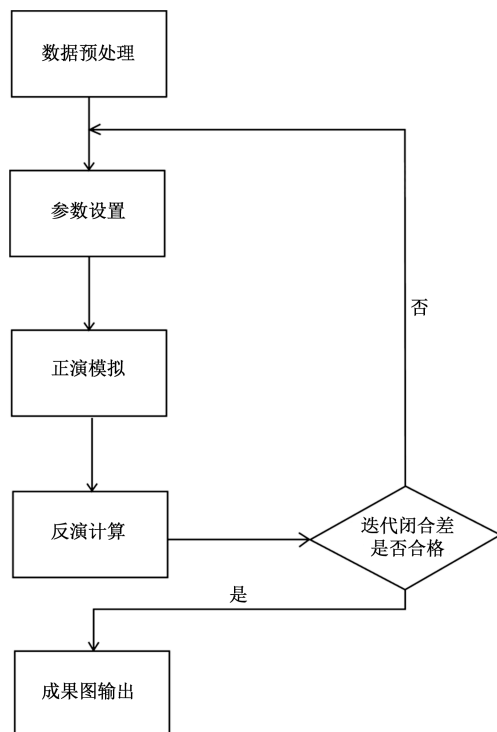


图 3 高密度电法数据处理流程

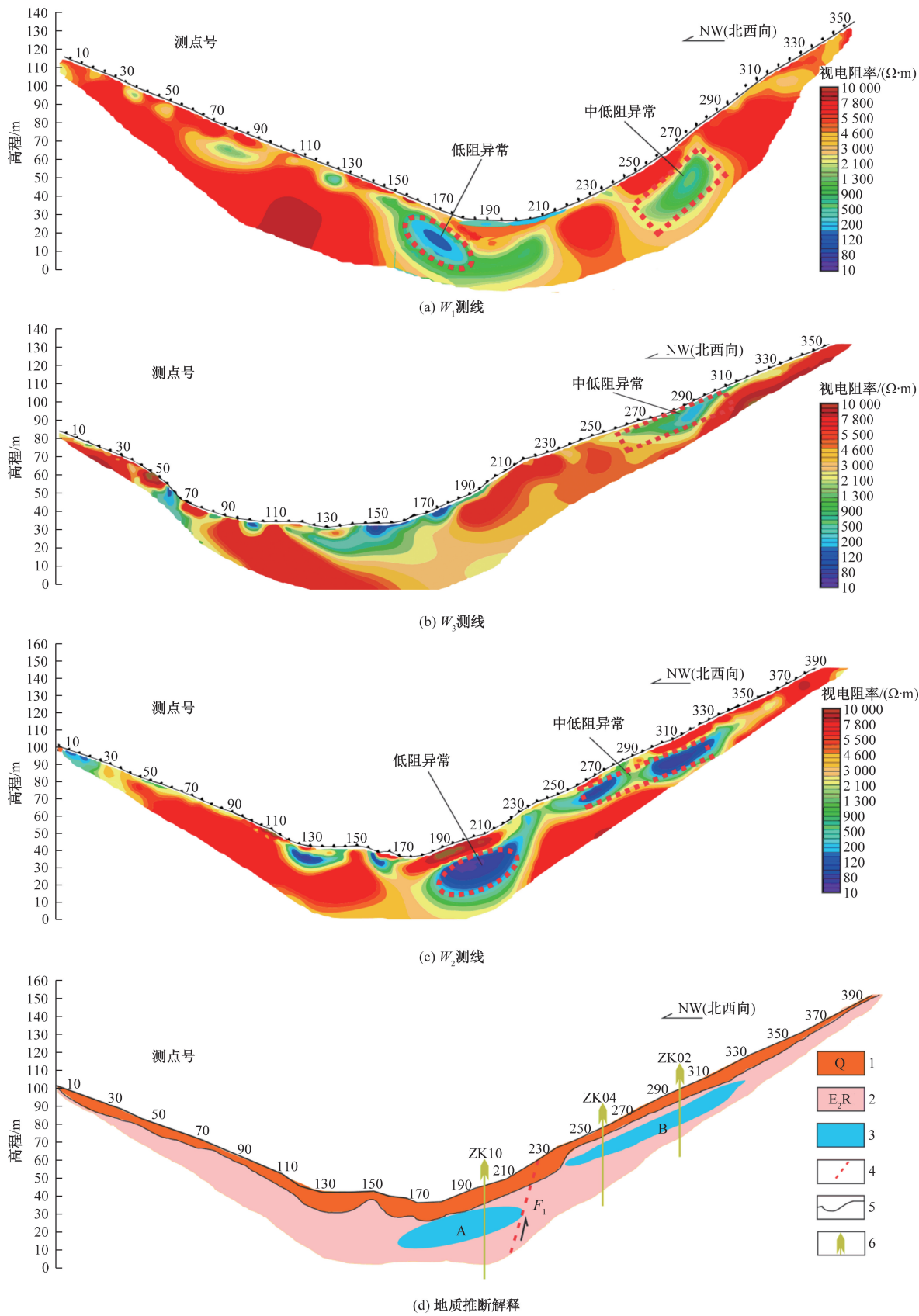


图 4 高密度电法反演剖面与综合地质推断解释

闭的团状,宽约为60 m。推断由河床上长期的水流通过断裂 F_1 向下渗流,最终形成富水构造破碎带。

(3)破碎带B。该破碎带位于测线南部,右岸山坡10 m以深,整体呈近东西向展布,平面形态呈条带状分布,宽约为80 m。推断为岩质边坡节理发育,且节理内部潮湿或者富水。

3.2 钻探验证

ZK10 钻孔位于测线200点旁[图4(d)],井深约117 m,钻孔深入至11.5 m遇黑云母花岗闪长岩岩体,在岩体中共遇4层破碎带,其中有2层(19.42~39.49 m和61.44~65.22 m)破碎带声波曲线幅值变大,钻孔电视显示结构面岩体破碎,产状约为 $NE\angle 46.79^\circ$,同时井壁破碎扩径现象明显;ZK04 钻孔位于测线260点旁,井深约70 m,钻孔深入约至6.2 m遇黑云母花岗闪长岩岩体,在岩体中共遇3层破碎带,其中有2层(9.83~11.11 m和15.24~16.77 m)破碎带声波曲线幅值变大,钻孔电视显示结构面岩体节理较破碎,产状约为 $SE\angle 55.61^\circ$;ZK02 钻孔位于测线300点旁,井深约78 m,钻孔深入约至5.5 m遇黑云母花岗闪长岩岩体,在岩体中共遇5层破碎带,其中有3层(20.93~21.20 m、32.17~36.74 m和43.35~44.12 m)破碎带声波曲线幅值变大,钻孔电视显示结构面岩体节理较破碎,产状约为 $NW\angle 67.14^\circ$ 。根据高密度电法 W_2 线二维反演结果综合分析,在200号测点覆盖层约10 m,地表以下为16~40 m与周围存在明显电性差异,表现为低电阻异常,推断异常区域为破碎发育带;在260号测点覆盖层约5 m,地表以下5~15 m与周围存在明显电性差异,表现为低电阻异常,推断为岩体节理破碎带;在300号测点覆盖层约8 m,地表以下为8~30 m与周围存在明显电性差异,表现为低电阻异常,推断为岩体节理破碎带,高密度反演成果与现场钻孔资料吻合较好。

综上所述,采用高密度电法反演剖面地质解释结果与钻孔资料较吻合,准确圈定了该区破碎带低电阻区,地层展布清晰,且地层埋深与钻井资料也较吻合。

4 结论

(1)本次工作在对抽水蓄能电站坝址区地段基覆界线、断裂和破碎带追踪中,根据实际地形地貌和探测要求,优选高密度电阻率物探方法,取得了良好的探测效果,初步查明了坝址区地下岩体结

构、岩性特征,推断断裂1条,圈定破碎发育带共2处,为下一步进行工程设计和处理提供了有价值的参考依据。

(2)对抽水蓄能电站坝址区地下岩体结构探测,体现了高密度电法具有适应性强、可靠性好、对岩体破碎带表现的相对低阻敏感性高、结果呈现直观性好的优点,进一步表明高密度电法是进行水库大坝地下岩体结构无损探测行之有效的物探方法。

(3)高密度电法在水利建设前期勘探中具有良好的应用前期,如何优化测线的布置,克服地形影响,增加有效探测深度,最大限度取得最优探测结果是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会,国家能源局. 水电发展“十三五”规划(2016—2020)[S/OL]. (2016-11-07)[2024-03-01]. <https://www.ndrc.gov.cn>.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2020年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [3] 徐洋洋. 基于高密度电法的五岳抽水蓄能电站上水库单薄分水岭岩体结构探测[D]. 郑州:华北水利水电大学,2022.
- [4] 库尔班江·尼牙孜,高正夏,王建平,等. 高密度电法在某抽水蓄能电站下水库探测中的应用[J]. 勘察科学技术,2022(3):57-59.
- [5] 蒋全科,雷宛,刘俊骥. 利用高密度电法勘探盐边县格萨拉巨型滑坡堆积体[J]. 科学技术与工程,2023,23(5):1853-1866.
- [6] 黄良冉,吴云星,冯春燕,等. 基于高密度电法探测与渗流监测的土石坝渗漏隐患综合研判[J]. 水力发电,2022,48(8):55-60.
- [7] 王伟,高星,张小艳等. 复杂山区高分辨率地震采集分析与应用——以四川盆地及周缘地区为例[J]. 地球物理学报,2018,61(3):1109-1117.
- [8] 高明,贺可强,刘洪华,等. 基于变权重的水库滑坡稳定性模糊综合评价[J]. 科学技术与工程,2022,22(10):3885-3891.
- [9] 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.
- [10] 刘海心,朱瑞,王文甫,等. 高密度电法在水库大坝渗漏勘察中的应用[J]. 人民黄河,2018,40(10):99-103.
- [11] 毛平尧. 工程物探技术在地下库可研阶段勘察中的应用[J]. 科技和产业,2020,20(7):145-149.
- [12] 刘艳秋,徐洪苗,胡俊杰. 综合物探方法在水库大坝隐患探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(4):546-551.

Detection of Underground Rock Mass Structure of Pumped Storage Power Station Based on High-density Resistivity Method

LI Yong, WANG Jialong, HUANG Xiaolin

(Hunan Lianzhi Technology Co. Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: There are many problems in the exploration of underground rock mass structure in pumped-storage hydroelectricity, such as water-involved, complex and changeable topography and high requirements of depth and resolution. A high-density resistivity detection method with strong adaptability, high stability and abundant information was proposed, which could meet the requirements of the detection depth and resolution of the underground rock mass structure of the dam, this method had a high sensitivity to the low resistivity anomaly, and had a significant advantage in the exploration of underground fracture zones and faults. Based on the analysis of three high-density resistivity profiles in the upper reservoir of Yongmu pumped-storage hydroelectricity, the distribution of the base-overlying boundary, fracture zones and faults in this section has been inferred and verified by field drilling, it is found that the inversion results are in good agreement with the borehole data, which lays a foundation for fault division, subsoil boundary confirmation and comprehensive geological interpretation. The results show the feasibility and effectiveness of high-density resistivity method in identifying the pumped-storage hydroelectricity underground rock mass structure.

Keywords: pumped-storage hydroelectricity; high-density resistivity method; low-resistivity anomaly; rock mass structure; comprehensive geological interpretation