

瞬变电磁法在水库大坝场地 勘察中的应用

扈本娜

河北省水利水电勘测设计研究院, 天津

收稿日期: 2021年12月2日; 录用日期: 2021年12月16日; 发布日期: 2021年12月23日

摘 要

由于复杂的地质条件导致的我国水库工程勘察难度不断增加, 所以采用有效的方法对水库坝体进行探测至关重要。文章以河北某水库大坝的勘察为例, 介绍了瞬变电磁的基本原理, 论述了该方法在坝址的覆盖层厚度以及基岩分界面探测中的效果。研究表明: 当地质条件复杂时, 瞬变电磁法在水利工程勘察中是可以得到良好的效果, 为国内其他同类水库工程的勘察工作提供了理论和实践依据。

关键词

瞬变电磁法, 水库大坝, 覆盖层, 基岩, 探测效果

Application of Transient Electromagnetic Method in the Investigation of Reservoir Dam

Benna Hu

Hebei Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Tianjin

Received: Dec. 2nd, 2021; accepted: Dec. 16th, 2021; published: Dec. 23rd, 2021

Abstract

Due to the complicated geological conditions, the difficulty of reservoir engineering investigation

is increasing, so it is very important to use effective methods to detect the dam site. Taking the investigation of a dam in Hebei province as an example, this paper introduces the basic principle of transient electromagnetic method, and discusses the effect of this method in detecting overburden thickness and bedrock interface of dam site. The results show that transient electromagnetic method can get good effect in reservoir engineering investigation when the geological condition is complicated, which provides theoretical and practical basis for other similar reservoir engineering investigation in China.

Keywords

Transient Electromagnetic Method, Reservoir Dam, Overburden, Bedrock, Detection Effect

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国水利水电建设的发展, 水库大坝的建设工程越来越多, 以此同时, 大坝建设面对的地质条件也越来越复杂, 前期的勘察工作越来越难, 因此需要利用有效的手段对坝基的覆盖层厚度以及基岩分界面进行准确探测, 以保证大坝坝体的结构的稳定性, 为后期防渗工作提供依据。近年来, 对于地形复杂地区的水利工程勘察, 瞬变电磁应用越来越广泛。薛云峰等利用瞬变电磁成像技术对某水库渗漏通道进行研究, 取得了较好的效果[1]; 苏向前等综合利用高密度电阻率法、地震折射波法与瑞雷波法对某水库的坝基的覆盖层厚度进行了探测, 取得了较好的效果[2]; 宋文博等在下坂水库坝基勘察过程中, 探讨了物探方法在覆盖层勘察中的可行性和可靠性[3]; 陈兴海等探讨了不同物探方法对于水库大坝渗漏的检测效果以及研究进展[4]; 陈军利用地震波速测试和钻孔声波测试相结合的方法, 对新疆某水利工程砂卵石层的密实程度[5]; 朱东军等利用高密度电法对岩溶发育地区坝址处的溶蚀情况进行探测, 对于坝基防渗处理提供了合理的建议[6]; 林立松等采用瞬变电磁对黄河花园口大堤背河坝基下地层进行探测[7]; 张伟等分析了瞬变电磁法在水利工程勘察中的优势以及应用策略[8]; 皮雷等利用综合物探技术对某水库大坝的渗漏隐患进行探测, 探测结果为该水库大坝的防渗工作提供了依据[9]; 徐维骏等开展了瞬变电磁对基坑帷幕墙渗漏的探测能力研究[10]; 吴群英等利用地面瞬变电磁对陕北矿区地下水资源进行探测, 分析了不同含水地层模型的瞬变电磁响应特征[11]。通过以上研究发现, 瞬变电磁对于水库渗漏问题探测较为成熟, 而在水库大坝坝址勘查中该方法也应用较少。因此, 本文结合河北某水库大坝的勘察工作, 利用瞬变电磁对坝基的基岩层进行探测, 为后期的大坝主体施工建设提供技术保障。

2. 瞬变电磁法

瞬变电磁(Transient Electromagnetic Method, 简称 TEM)属于时间域电磁感应类方法, 遵循电磁感应原理, 主要是利用接地线源或不接地回线作为发射装置向地下发射脉冲电磁场(称为一次场), 地下导电介质在一次场的作用下产生感应场(称为二次场), 在一次场间歇期间利用接地电极或不接地回线作为接收装置接收观测二次场随时间的变化特征, 从而获得地下不同深度电性分布情况[12], 达到勘探地下情况的目的, 其基本原理如图 1 所示。

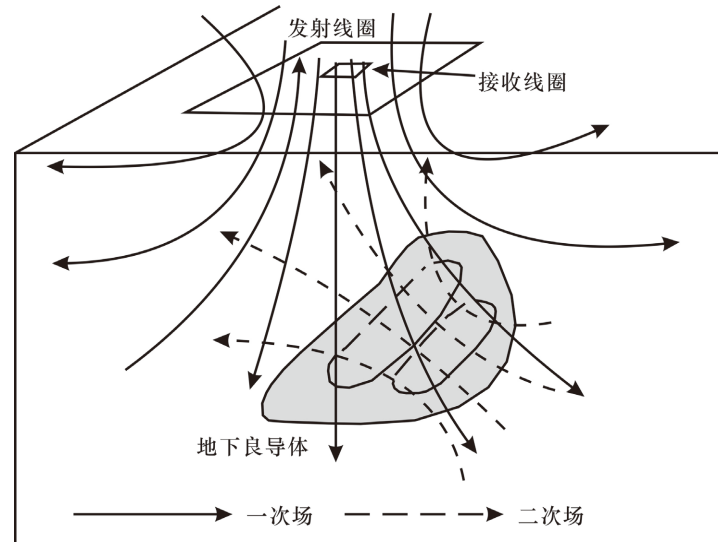


Figure 1. The principles of transient electromagnetic method
图 1. 瞬变电磁基本原理

3. 工区地质概况及地球物理特征

3.1. 地质概况

拟建水库位于河北张家口市，地处内蒙古高原向华北平原的过渡带，位于燕山山脉北侧，地貌属中、低山及冲蚀黄土峁、黄土台地地貌景观，其间沟谷发育，并形成较大型冲沟河谷。山脉在本区多呈东西走向，分布在清水河两岸。低山多呈浑圆型，一般相对高差 50~100 m；中山多陡峭，高程一般 1000.0~1154.0 m，最大高程 1494 m，一般相对高差 300~520 m。黄土峁、黄土台地多分布于中、低山的 III、IV 级基座阶地，一般高出河床 20~50 m 以上。河流左、右岸基岩风化剥蚀形成中、低山，由于河流具侧向侵蚀作用，靠近河岸一侧多形成悬崖峭壁，地势陡峭。现代河床两侧分布漫滩及 I 级堆积阶地，两岸有 II、III、IV 级阶地，其中 III、IV 级阶地最为发育，阶面宽阔，高出河床 50~100 m，多覆盖黄土状土，下部为岩体。

区域内出露的岩性主要为太古界崇礼组(Arch)片麻岩、角闪岩等；中生界侏罗系上统响北营组(J_3t^1)粗面岩、流纹岩、火山角砾岩、凝灰岩、流纹集块岩；第四系(Q)松散岩层。

现将地层由老至新分述如下。

1) 太古界崇礼组(Arch): 主要为中深变质的角闪斜长片麻岩及斜长角闪岩组成，花岗变晶结构，条带状构造，主要矿物成分为普通角闪石、中长石、石英等，混合岩化作用较深，广泛形成条痕、条带、条纹状混合岩及花岗质混合岩等，主要分布在东沟坝址区。

2) 侏罗系上统响北营组(J_3t): 为火山喷出岩类，与下伏片麻岩呈角度不整合接触。

① 第一段(J_3t^1): 以角砾凝灰岩、流纹质凝灰岩及凝灰质砂岩为主，夹薄层角砾岩，厚约 550 m，广泛分布在西沟五十家坝址区。

② 第二段(J_3t^2): 以流纹岩、粗面岩为主。流纹岩为斑状结构，流纹构造，斑晶主要为石英及透长石、斜长石，不规则的拉长气孔平行流纹分布，大小不等，分布不均。粗面岩为斑状结构、块状构造，斑晶主要为钾长石、斜长石、透长石及少量石英，基质主要为透长石。火山角砾岩为角砾结构，块状构造，角砾为棱角状-次棱角状，胶结较紧密。分布在南地坝址区下游。

3) 第四系地层(Q)

① 上更新统下段冲洪积(Q_3^{alp}): 卵石，分布较稳定，厚度一般 1~5 m，最大厚度约 8.22 m，多分布

于III、IV级阶地下部，上覆黄土状土，下伏基岩。

② 上更新统中段冲洪积(Q_3^{2ab}): 黄土状土，灰黄色，厚度一般 5~25 m，最大厚度约 60 m，粉粒含量较高，局部夹黄土状砂壤土，覆盖于卵石(Q_3^{1ab})或基岩之上。

③ 全新统冲洪积(Q_4^{ab}): 卵石，厚度 10~20 m，分布于现代河床及漫滩，分布稳定。

壤土、砂壤土，厚 0.5~10 m，主要分布在河漫滩表层，多为耕植土。

④ 全新统残坡积、坡洪积、冲积、崩积(Q_4^{ld} 、 Q_4^{pld} 、 Q_4^{al} 、 Q_4^{col}): 分布在山麓、沟头、河床等部位，岩性分别为含壤土碎石、含碎石(卵石)壤土、卵石及含壤土碎石等。

3.2. 地球物理特征

根据前期物探资料及本次物探资料，可知各地层电阻率值(表 1)。

Table 1. Resistivity value of lithologic

表 1. 岩性电阻率值

土(岩)名称	电阻率($\Omega \cdot m$)	备注
黄土状壤土	40~150	
片麻岩	600~2000	风化后电阻率值降低
凝灰岩	150~400	风化后电阻率值降低

瞬变电磁法是根据岩性的电性差异来判断划分地层的，由表 1 可知，本测区不同岩性之间存在明显的电性差异，具备开展瞬变电磁法勘探的地球物理前提。

4. 工程布置和数据采集

在该拟建水库的东坝——新营子坝址右坝肩，共布置 8 条剖面，点距 5 m，剖面长度 85~250 m，测线布置图如图 2 所示。

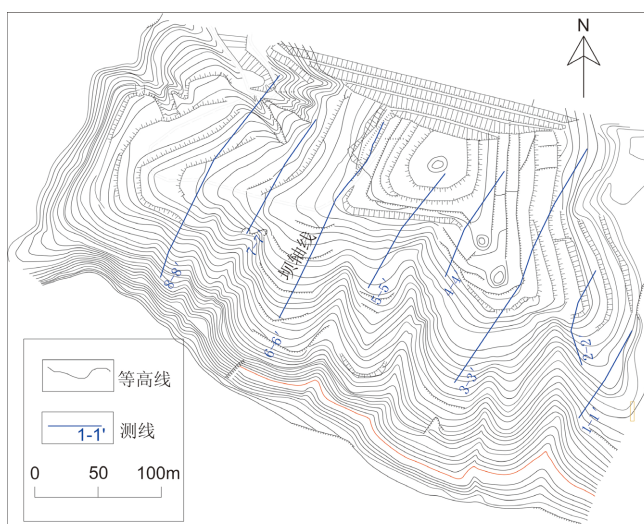


Figure 2. The layout of survey lines

图 2. 工程布置图

此次野外工作投入使用仪器为重庆奔腾数控技术研究所生产的 WTEM-2Q 瞬变电磁仪。采用中心回

线装置，多匝小线圈观测方式，即：发射线圈尺度为 $5 \times 5 \text{ m}$ ，10 匝；接收线圈尺度为 $2 \times 2 \text{ m}$ ，10 匝；发射频率为 32 Hz，时窗数 31 个， $t_{\max} = 2.0017 \text{ ms}$ ，供电电流在 5~7 A 之间。

为了能够采集到精确可靠的原始数据，在野外工作中还采取了以下措施[13]：

1) 现场施工过程中，尽量保持发射线圈和接收线圈水平放置，即保证发射磁矩的准确性以及观测数据的稳定性，为后期数据处理夯实基础。

2) 为了提高观测资料的信噪比，降低干扰，尽量采用较大的叠加次数；同时还要兼顾采集时间，根据现场干扰情况，动态调整叠加次数。

3) 为了保证较大的发射磁矩，尽量使用电阻率小、绝缘性能好的导线作为发射线圈。

4) 工作中发现异常及畸变点及时布置重复观测和检测，注意地电干扰的影响，保证原始记录的质量。

5. 资料处理与解释

5.1. 影响因素分析

由瞬变电磁的基本原理可知，该方法是纯二次场测量，具有不受地形影响、穿透高阻能力强以及对低阻异常敏感的优点。但是受电磁场特性影响，存在以下几方面因素会影响实测资料的处理和解释。

1) 根据电磁场的扩散规律，瞬变电磁场在低阻体内扩散速度较慢，所以当地表存在低阻覆盖层时，探测相同深度需要的观测时间会增加。因此，数据解释中应考虑浅地表的低阻覆盖层的影响。

2) 由于电磁法易受干扰影响，因此除了在采集过程中利用多次叠加技术外，在数据处理过程中还需要对数据进行预处理，消除干扰。

3) 受体积效应影响，瞬变电磁法仅能反应地下介质的电性分布情况，而不能准确圈定异常边界。受自感效应影响，瞬变电磁探测在浅部存在一定的盲区，所以在浅部资料解释过程中，需要结合地质资料或钻孔资料开展。

5.2. 资料处理

1) 数据导入与格式转换

此次瞬变电磁法数据使用吉林大学的 GeoElectro 电法数据处理系统进行处理，首先将仪器采集的原始数据通过传输软件传到微机中，再将其数据格式转化为 GeoElectro 使用的 WTEM.dat 格式，通过加载项将各点数据调入到处理系统中。

2) 数据截断与光滑

野外数据采集时，由于 IP 效应、局部噪音和其它干扰因素的影响，导致衰减曲线会出现尾部畸变和个别“跳点”现象，影响资料的可信度，对前者需进行数据截断，不仅使激电效应消除，而在噪音较强的情况下，对晚期数据通常也要进行截断；后者通过数据编辑和处理，将个别跳点进行剔除或调整，对曲线进行“圆滑”处理，以便提高资料的解释精度。

3) 地形数据编辑

为了避免地形起伏对数据处理的影响，先将测点高程输入到软件中，生成地形文件，在视电阻率成图时可将其直接调入绘制带有地形的等值断面图。

4) 视电阻率的计算

鉴于所采用的观测装置类型和探测覆盖层厚度较大，则采用晚期视电阻率计算公式[14]：

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\mu M q}{5tV(t)} \right)^{2/3} \quad (1)$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ， t 为测道时间， M 为发射磁距， q 为接收线圈的有效面积， $V(t)$ 为接收线圈感应电压值。实际观测的是归一化感应电压 $V(t)/I$ ，因此上式的实际应用式为[15]：

$$\rho_r = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\mu_0 A q}{5t(V(t)/I)} \right)^{2/3} \quad (2)$$

式中， A 为发送回线面积。

5) 反演处理

对于瞬变电磁的数据反演，采用的是带地形的二维反演技术。首先，将处理后的感应电动势数据转换成视电阻率数据，随后根据三角形网格剖分方法进行模型的离散，采用最小二乘法进行二维反演[16]。纵观其各剖面反演电阻率断面图可以看到，在其探测深度范围内自上而下可划分低、高两个电性层，分别为不同电性的岩层反映特征，将作为岩层推断解释的主要基础。

瞬变电磁法反演电阻率断面分布可直观表述地下介质的电性特征，上部黄土状壤土呈低阻特征，片麻岩，凝灰岩呈高阻特征，强风化基岩电阻率值偏低，但相对于黄土状壤土仍为高阻。

5.3. 资料解释

5.3.1. 剖面解释

综合已有地质资料与物性资料对每条测线反演结果进行了数据解释，现以 1-1'剖面、2-2'剖面、4-4'剖面 和 7-7'剖面为例进行解释说明。

图 3 所示为新营子坝址右坝肩 1-1'剖面瞬变电磁反演成果，该剖面位于坝轴线上游 250 m 处，方位南偏西 210°，剖面长度 85 m，覆盖层为黄土状壤土，基岩为片麻岩。由瞬变电磁反演成果图所示，结合物性资料，上部厚度 18~20 m 左右的低阻层为黄土状壤土，其下部高阻层为片麻岩，基岩面高程为 1024~1035 m，其变化趋势与地形起伏情况大体相同。

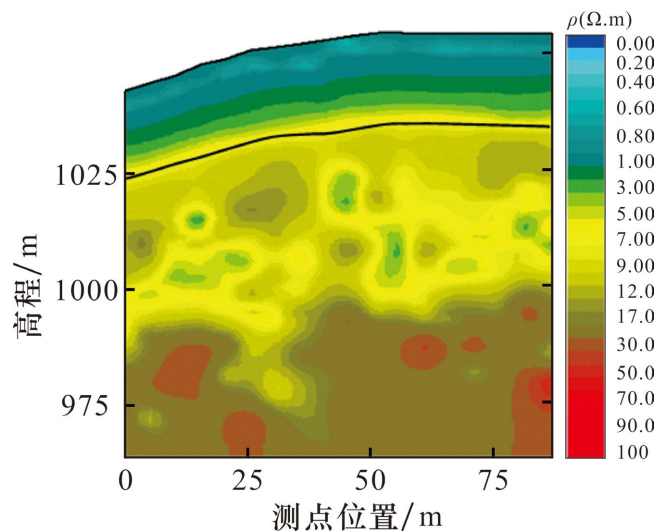


Figure 3. The inverted resistivity of section 1-1'
图 3. 1-1'剖面瞬变电磁电阻率反演断面图

图 4 所示为新营子坝址右坝肩 2-2'剖面瞬变电磁反演成果，该剖面位于坝轴线上游 200 m 处，方位南偏西 206°，瞬变电磁剖面长度 85 m，覆盖层为黄土状壤土，基岩为片麻岩。由瞬变电磁反演成果图所示，结合物性资料，上覆厚度 18~21 m 左右的低阻层为黄土状壤土，其下部高阻层为片麻岩，基岩面高

程为 1029~1049 m，其变化趋势与地形起伏情况大体相同。

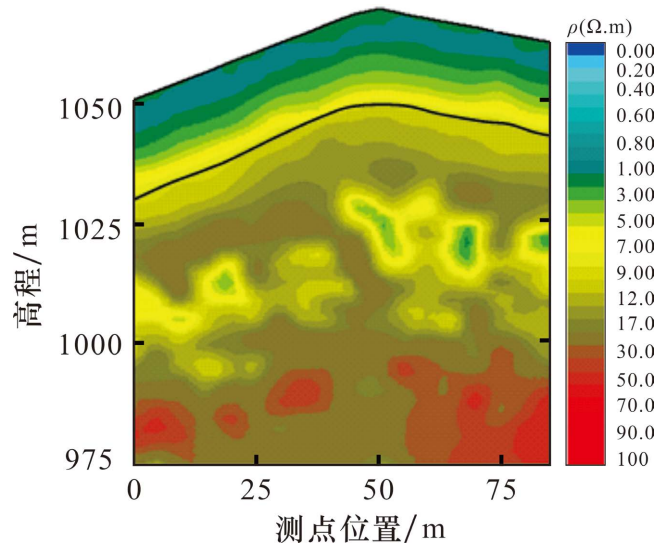


Figure 4. The inverted resistivity of section 2-2'
图 4. 2-2'剖面瞬变电磁电阻率反演断面图

图 5 所示为新营子坝址右坝肩 4-4'剖面瞬变电磁反演成果，该剖面位于坝轴线上游 100 m 处，方位南偏西 210°，瞬变电磁剖面长度 95 m，覆盖层为黄土状壤土，基岩为片麻岩。由瞬变电磁反演成果图所示，结合物性资料，上覆厚 15~27 m 左右的低阻层为黄土状壤土，其下部高阻层为片麻岩，基岩面起伏不大，基岩面高程为 1047~1066 m。

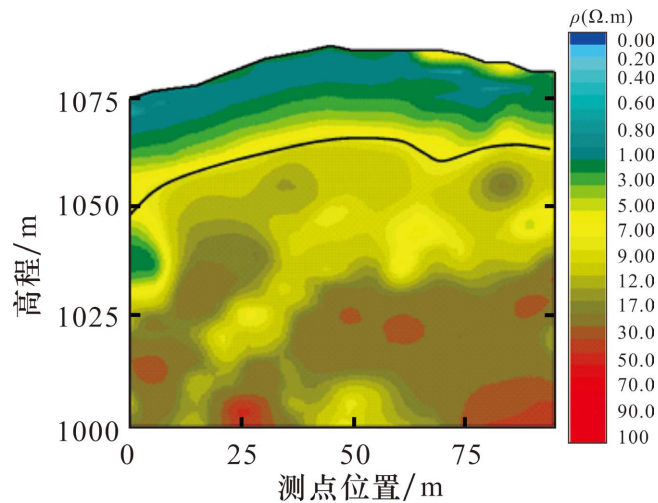


Figure 5. The inverted resistivity of section 4-4'
图 5. 4-4'剖面瞬变电磁电阻率反演断面图

图 6 所示为新营子坝址右坝肩 7-7'剖面瞬变电磁反演成果，该剖面位于坝轴线下游 50 m 处，方位南偏西 210°，瞬变电磁剖面长度 95 m，覆盖层为黄土状壤土，基岩为片麻岩。由瞬变电磁反演成果图所示，结合物性资料，上覆厚 26~42 m 左右的低阻层为黄土状壤土，其下部高阻层为片麻岩，基岩面起伏大，基岩面高程为 1025~1045 m。

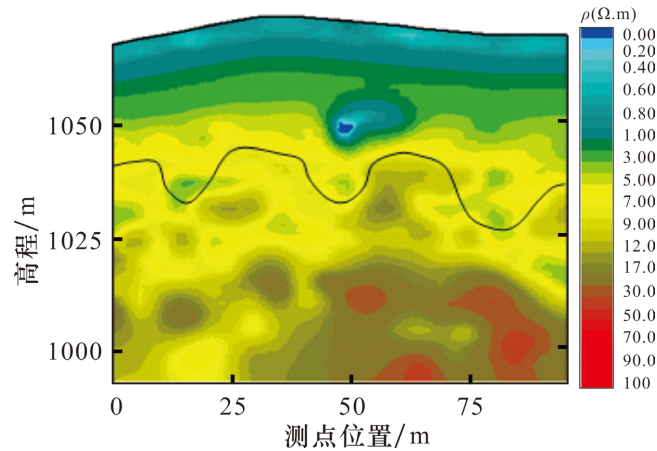


Figure 6. The inverted resistivity of section 7-7'
图 6. 7-7'剖面瞬变电磁电阻率反演断面图

5.3.2. 平面解释

综合全区 8 条瞬变电磁测线的解释结果，综合每条剖面上推断出的基岩高程绘制出基岩面等高线图及覆盖层等厚度图，如图 7 和图 8 所示。

由基岩面等高线图和覆盖层等厚度图可以看出，研究区内基岩面高程在 1020~1070 m 左右，覆盖层厚度在 20~50 m 左右。坝轴线上游基岩面起伏相对较缓，基岩面高程在 1040~1080 m 左右，坝轴线上游上方覆盖层厚度 20 m 左右，坝轴线上游下方覆盖层较厚，厚度达 45 m 左右；坝轴线下游地形起伏大，沟坎多，基岩面高程低于 1060 m，覆盖层厚度在 30~50 m 左右。

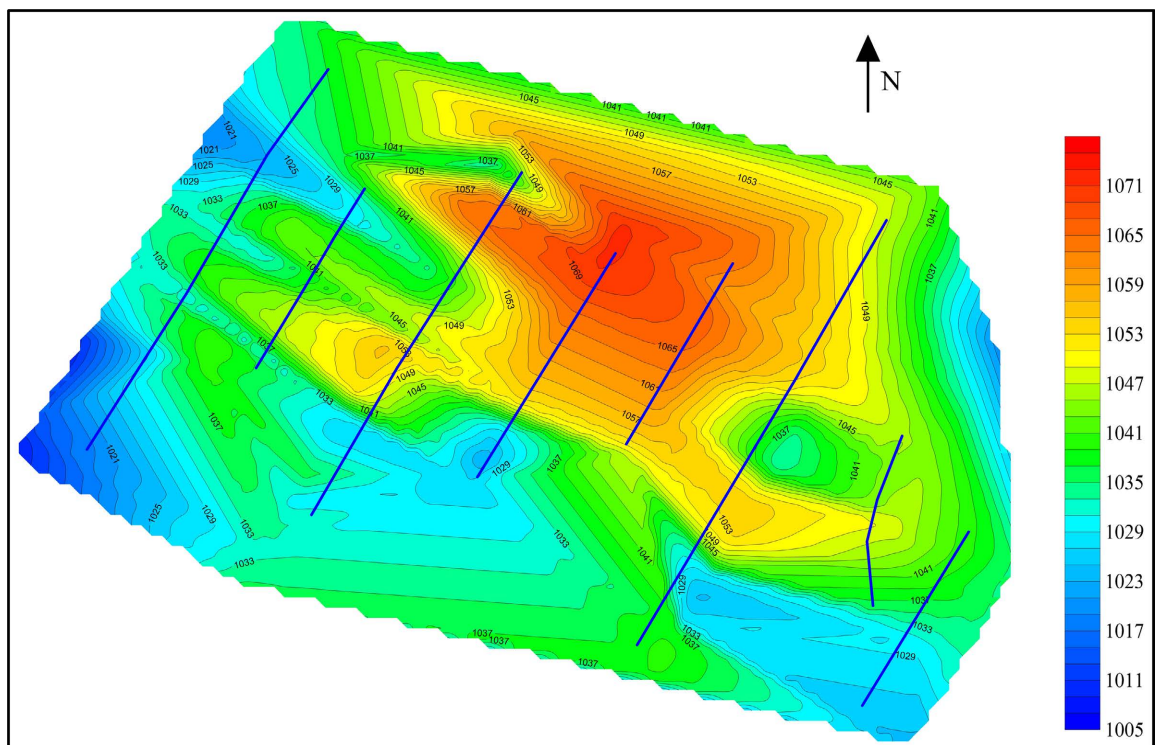


Figure 7. Contour map of bedrock surface
图 7. 基岩面等高线图

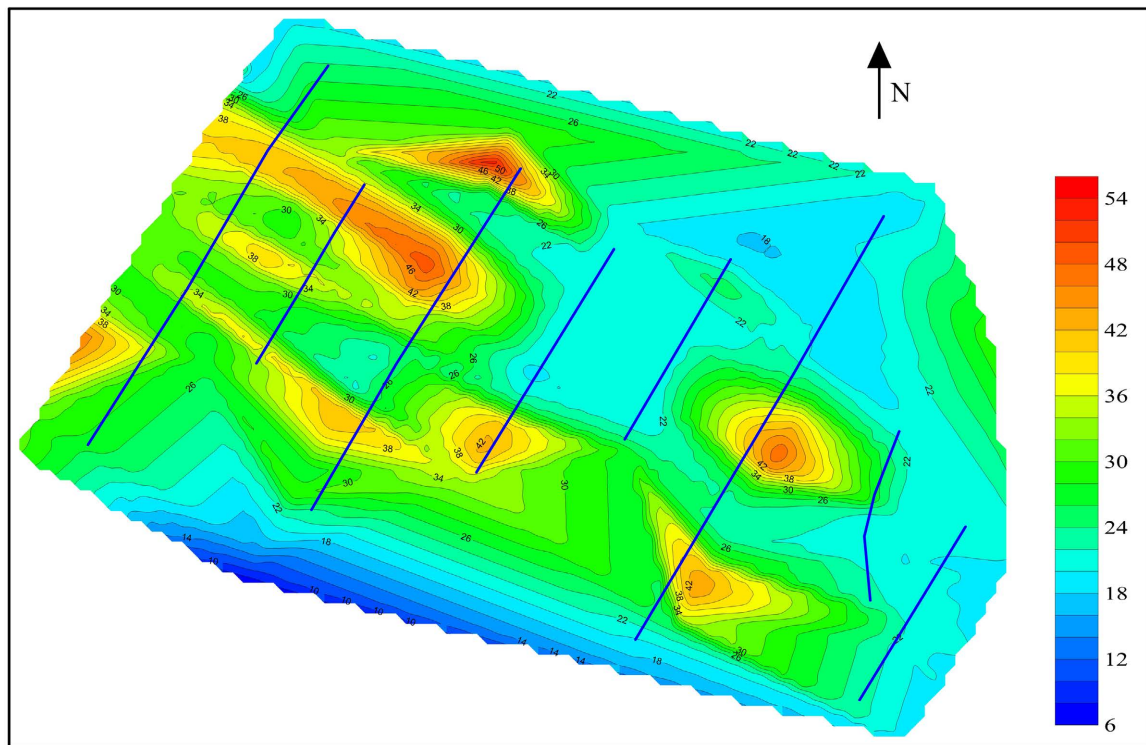


Figure 8. Equal thickness diagram of overburden

图 8. 覆盖层等厚度图

6. 结论

1) 通过利用瞬变电磁法对河北某水库大坝坝基探测, 查明了坝址基岩埋深及覆盖层厚度, 在研究区内区基岩面高程在 1020~1070 m 左右, 覆盖层厚度在 20~50 m 左右。坝轴线上游基岩面起伏相对较缓, 其高程在 1040~1080m 左右, 覆盖层厚度 20~45 m 左右; 坝轴线下游地形起伏大, 沟坎多, 基岩面高程在 1060 m 以下, 覆盖层厚度在 30~50 m 左右, 对于后续水库坝体建设提供了技术支撑。

2) 研究表明瞬变电磁在水利工程勘察中是有效的、可行的, 能够得到良好的勘察效果, 因此对于地形条件复杂、不利于开展前期勘察工作的水利建设工程, 可以大力推广瞬变电磁法的应用。

基金项目

河北省自然科学基金项目(D2020402032)。

参考文献

- [1] 薛云峰, 孙晓墩, 孙雅芳. 瞬变电磁电阻率成像法探测岩体渗漏通道的研究及应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 96-98.
- [2] 苏向前, 刘康和, 林洪辉, 等. 综合物探在坝基勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2006(S1): 270-273.
- [3] 宋文博, 杨西林, 王新华. 下坂地水库坝基深覆盖层勘察与防渗处理[J]. 水利规划与设计, 2009(5): 80-82.
- [4] 陈兴海, 张平松, 江晓益, 等. 水库大坝渗漏地球物理检测技术方法及进展[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(2): 160-165.
- [5] 陈军. 新疆某水利枢纽工程砂卵石坝基勘察分析[J]. 人民长江, 2015, 46(1): 36-39, 57.
- [6] 朱东军, 叶茂. 重庆复杂山区灰岩坝基勘察技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(6): 213-214.
- [7] 林立松, 毋光荣, 刘玉莉, 等. NanoTEM 在浅部工程勘察中的应用[C]//2016 中国地球科学联合学术年会论文集

- (四十)——专题 82: 地球物理科技成果推广平台、专题 83: 东亚大陆边缘-西太平洋构造地质过程(中国海陆地质学系列图编制). 北京: 中国学术期刊电子出版社, 2016: 15-18.
- [8] 张伟, 许昕鹏. 瞬变电磁法在水利工程冬季勘察中的应用分析[J]. 工程建设与设计, 2020(2): 92-93.
- [9] 皮雷, 谭磊, 李波. 综合物探方法在水库绕坝渗漏隐患探测中的应用[J/OL]. 中国农村水利水电, 2021: 1-6. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20211020.1010.040.html>, 2021-10-20.
- [10] 徐维骏, 沈建国, 沈永进, 等. 基坑帷幕渗漏瞬变电磁检测方法研究[J/OL]. 地球物理学进展, 2021: 1-17. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20211111.1429.004.html>, 2021-11-15.
- [11] 吴群英, 胡雄武, 王宏科. 陕北煤矿区地下水资源地面瞬变电磁法探查实践[J/OL]. 煤炭科学技术, 2021: 1-9. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-0565>, 2021-10-22.
- [12] 谭新平, 徐志敏, 辛会翠, 等. 瞬变电磁法二维正演数值模拟及在工程勘察中的应用效果分析[J]. 工程勘察, 2016, 44(7): 68-75.
- [13] 何国全. 瞬变电磁法在公路隧道工程勘测中的应用[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(5): 640-642.
- [14] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [15] 姜国庆, 程久龙, 孙晓云, 等. 全空间瞬变电磁全区视电阻率优化二分搜索算法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2482-2488.
- [16] 郭建永, 刘超, 王占雷, 等. 瞬变电磁勘探技术在某采空区探测中的应用[J]. 建筑科学, 2012, 28(S1): 191-193, 214.