DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.03.26

基于音频大地电磁测深法数据的不良地质体探测研究
——以西藏某水利工程为例

尹 剑[1,2], 张建清[1,2]

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江地球物理探测(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 作为一种经济、高效的地球物理方法,音频大地电磁测深法被广泛地应用于水利工程勘察中,但在青藏高原高海拔地区实施并不容易。以西藏地区某水利工程为研究对象,基于音频大地电磁测深数据,采用视电阻率拟断面图、一维和二维反演成像、正演模型验证等技术手段,结合区内其他地质和地球物理资料进行综合地质解释,分析了研究区下方1 km以浅的沉积层、岩石基底和含水断裂带等主要构造。结果表明:音频大地电磁测深法在西藏水利工程勘察中具有较强的适用性及可靠性;对探测隐伏断层、富水区等不良地质体有很好的应用效果;该方法约束出的地下电性结构异常具有较强的地质意义,可以用来指导水利工程的选址及施工。

关键词: 音频大地电磁测深法; 二维反演; 正演模型验证; 隐伏断层; 不良地质体; 青藏高原

中图分类号:TV221.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2020)03-0180-06

Detection of unfavorable geological bodies based on the data of audio magnetotelluric sounding method: A case study of a water conservancy project in Tibet

YIN Jian[1,2], **ZHANG Jianqing**[1,2]

(1. *Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Co., Ltd., Wuhan* 430010, *China*;
2. *Changjiang Geophysical Exploration & Testing Co., Ltd., Wuhan* 430010, *China*)

Abstract: As an economical and efficient geophysical method, audio magnetotelluric sounding method (AMT) has been widely used in water conservancy engineering investigations, but its implementation in high altitude area of Qinghai-Tibet Plateau is complicated. In this study, with a water conservancy project in Tibet as the research object, we used apparent resistivity pseudo section map, one and two-dimensional inversion imaging and forward modeling verification methods to analyze the main structural components of the shallow sedimentary layer, rock basement and water bearing fracture zone 1 km under the study area, based on the AMT data and other geological and geophysical data in this area. The results show that AMT has strong applicability and reliability in the investigation of water conservancy projects in Tibet with the advantages of finding the buried faults, water-rich areas and other unfavorable geological bodies. The discovered electrical anomalies herewith hold strong geological significance to the surveys of location and construction of water conservancy projects.

Key words: audio magnetotelluric sounding method (AMT); two-dimensional inversion; forward modeling verification; buried fault; unfavorable geological body; Qinghai-Tibet Plateau

1 研究背景

水利工程中的水库坝堤是地方政府水资源管理、防洪减灾的重要基础设施,它的安全性不仅与施工质量有关,而且与坝基岩体稳定性有很大关系。从以往发生的水库大坝失事事件调查发现,事故多发生于坝基处,原因是其下部常存在不良地质体,由于施工前没有彻查及妥善有效处置,使建后坝体出现不均匀沉降或位移等现象,严重时可能出现溃坝风险,造成巨大的生命和财产损失。因此对水利工程实施勘察[1]工作显得尤为重要。

水利工程中的不良地质体有深厚覆盖层[2]、隐伏断层[3]、岩溶洞穴[4]等,这些工程地质难题都会对工程的安全性产生严重的后果。深厚覆盖层具有透水性

收稿日期:2019-07-02; **修回日期**:2019-09-26
基金项目:长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目(CX2016Z35)
作者简介:尹 剑(1986-),男,四川夹江人,工程师,主要从事工程地球物理勘探工作。

强、堆积厚度大、结构松散等特征,在条件比较差的地层上建筑大坝,将对坝基处理造成很大的困难;隐伏断层、岩溶洞穴一般在地表很少露头,如果在坝址区、库区、引水隧洞[5]有隐伏断层或发育岩溶,而在前期勘察中没有发现,将为水工建筑物带来巨大的隐患。解决这些地质难题的常规勘探手段有钻探、硐探、槽探等,但这些手段往往需要借助大型的机械装备,施工周期长,且需要投入相当大的人力、物力和财力。在青藏高原这样高海拔地区,并不容易实现[6]。

近年来随着科技的发展和仪器设备的更新,工程物探作为水利工程勘察的前沿学科发挥了举足轻重的作用。音频大地电磁测深法[7](audio magneto-telluric sounding method,简称 AMT)、高密度电法[8]等方法在探测深厚覆盖层、隐伏断层、岩溶洞穴等方面已由辅助手段转为主要手段。由于不同年代和不同岩性的岩石往往具有不同的电性差异,AMT 通过采集天然电磁场信号经数据处理可获得地下电阻率的分布,通过对地下电阻率的分析,从而在水利水电工程的不良地质体中开展应用,国内已取得了诸多的成功案例[9-10]。

在实际工作中,早期国内用户通过采集标量 AMT 数据,在 TM 模式[11]下数据处理后绘制的视电阻率等值线图因局部的低阻体和地表地层不均匀的作用,常造成似断裂构造的假异常,对后期地质解释带来困难,而 TE 模式[12]下数据处理绘制的视电阻率等值线图虽受静态效应的影响不大,但对实际的断裂构造位置却没有突出的异常显现。随着大地电磁数据反演算法及代码的飞速发展,上述问题得到了有效解决。目前 AMT 数据处理常用博斯蒂克[13]或 Occam[14]一维反演、NLCG[15]二维反演等,这些反演方法在工程中都得到了较广泛的应用[16,13]。

本文基于西藏某水利工程工区采集的标量 AMT 数据,绘制出视电阻率拟断面图,并进行一维和二维反演获得电阻率模型,并对这几种反演方法进行了对比及可靠性验证。结果表明,音频大地电磁二维反演能够在西藏水利工程勘察领域中取得很好的效果,本研究建立了一套获得可靠地下电阻率模型,其具有可靠度验证的完整技术流程,为后期该方法在水利工程勘探领域中的进一步推广提供指导依据。

2　研究区的地质概况与 AMT 数据测点位置

工程区位于西藏,地层属冈底斯 - 腾冲地层区的拉萨 - 察隅地层亚区,由元古界 - 第四系组成,出露不全,连续性差,多呈断层接触。区域地质及 AMT 数据测点布置如图 1 所示。

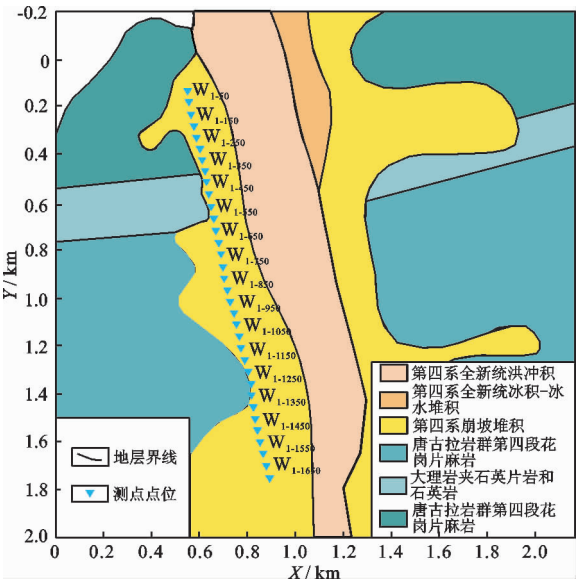


图 1　研究区地质及 AMT 测点位置图

测区基岩主要为变质岩,从老至新分别有:(1)中新元古界念青唐古拉岩群 a 岩组,以各种片麻岩为主,夹有片岩、斜长角闪岩、变粒岩及少量大理岩,厚度大于 7 639 m。(2)前奥陶系雷龙库岩组,下部以二云母角闪石英岩,片理化细粒石英岩为主,夹绿帘黑云角闪粒岩、细粒黑云母石英片岩、长石石英黑云母千枚片岩;上部为细粒绿泥二云母石英片岩夹片理化含黑云母细粒石英岩,细粒石榴石黑云母石英片岩,黑云角闪变粒岩组成,厚度为 4 523 m。(3)石炭系下统诺错组,下部为变质细砂岩与粉砂质板岩互层,夹结晶灰岩、变质安山岩,变质安山质晶屑凝灰岩;上部为变质细砂岩夹结晶灰岩,板岩,大理岩,最大厚度为 2 646 m。(4)石炭系 - 二叠系来姑组,以含砾板岩、深灰色板岩为主;夹细砂岩、细 ~ 粉砂岩及少量碳酸盐岩,厚度约 5 069 m。(5)二叠系中统洛巴堆组,下部为灰岩夹鲕粒灰岩及变质含砾细粒石英岩和深灰色板岩等;中部为含砾质不等粒石英砂岩夹粉砂质板岩;上部为粉晶灰岩,局部夹泥质灰岩,厚度大于 852 m。(6)二叠系上统西马组,为含砾变质杂砂岩、变质细 ~ 粉砂岩、板岩和千枚岩,夹少量灰岩或透镜体,厚度大于 2 553 m。

工程区岩浆活动频繁而剧烈,活动受构造控制明显。岩浆岩岩类齐全,以中酸 - 酸性侵入岩分布最广,次为基性 - 中酸性 - 酸性喷出岩,夹于不同时代的地层之中。第四系成因类型主要有洪冲积、冰碛和冰水堆积、湖积、滑坡、崩积、泥石流堆积等。工

程区大地构造位置隶属于冈底斯－念青唐古拉山板片的隆格尔－工布江达中生代断隆带，断裂构造发育。主要构造方向为 NWW、NW 向，少量 NE 向、弧形构造。构造行迹主要为断裂，褶皱不发育。

3 音频大地电磁测深数据采集和处理

3.1 音频大地电磁测深原理[17]

音频大地电磁测深法属于大地电磁法的一个分支，是基于电磁感应原理，经地面采集太空电磁波入射地球引起的二次场信号，经过处理和计算得出地下岩土体的电阻率值分布的频率域电磁法，其测量的频率范围一般在 10 ~ 105 Hz。电磁波向地下传播时，其强度随深度增加而减弱，其中高频电磁波衰减较快，穿透深度浅，通过计算可以得到浅层地质体的电性分布，低频电磁波衰减慢，可穿透深部地层，通过计算可得到深层地质体的电性分布。

3.2 数据采集与预处理

本次音频大地电磁勘探工作采用的仪器为 EH－4 剖面电导率成像系统。采集剖面与北西西向的覆盖层与基岩的分界线基本平行，测点间距 50 m，有效测点数为 34 个，总剖面长度约为 1 650 m。在数据采集时，采用了电极方向垂直于构造走向采集 *Ex* 分量、磁探头平行构造走向采集 *Hy* 的数据采集方式，以获得 *Zxy* 阻抗分量。

此设备可以通过采集人工或天然电磁场信号，在地形复杂的情况下开展电导率连续剖面测试。本次数据采集使用天然场信号，采集频率范围为 10 ~ 10^5 Hz，选择干扰背景比较平静的时间进行。通过设备对采集点的电磁场分量观测，得到互相垂直的时间域磁场分量 *H* 和电场分量 *E*，经傅立叶变换将时间域信号转换为频率域信号，最后通过功率谱计算得到视电阻率测深曲线。仪器操作员野外采集时，能看到实测单点的测深曲线，对于质量较差的测点，通过提高采集次数或改善接地条件等方法来提高数据质量。后期处理中还可以剔除质量差的频点，最终获得的视电阻率和相位曲线，部分 AMT 测点的视电阻率和相位曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出数据受到的畸变和干扰较小，数据质量较好。实测电阻率与二维反演响应电阻率拟断面图见图 3；实测相位与反演响应相位拟断面图见 4。

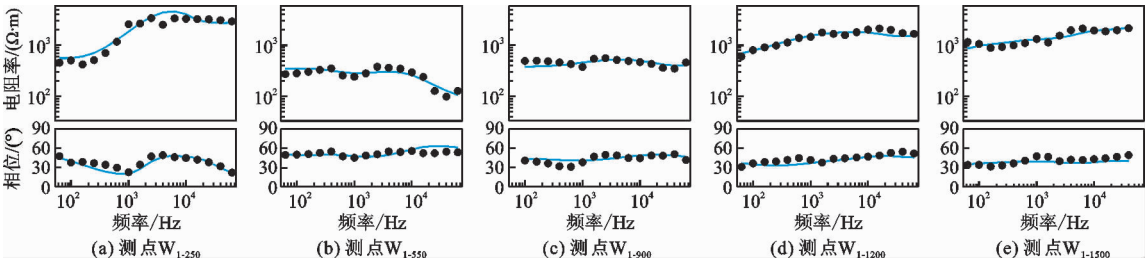


图 2 部分 AMT 测点的视电阻率和相位曲线

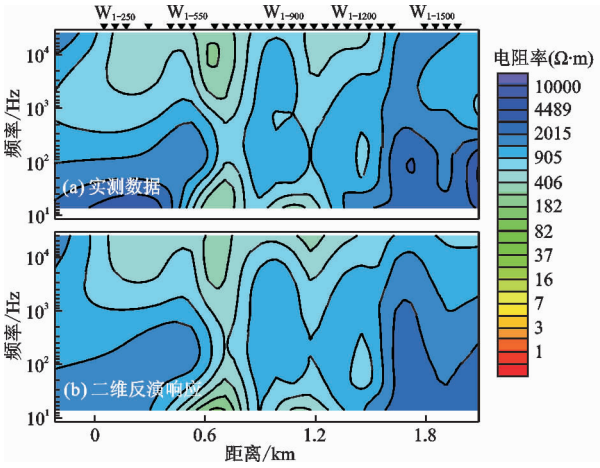


图 3 实测电阻率与二维反演响应电阻率拟断面图

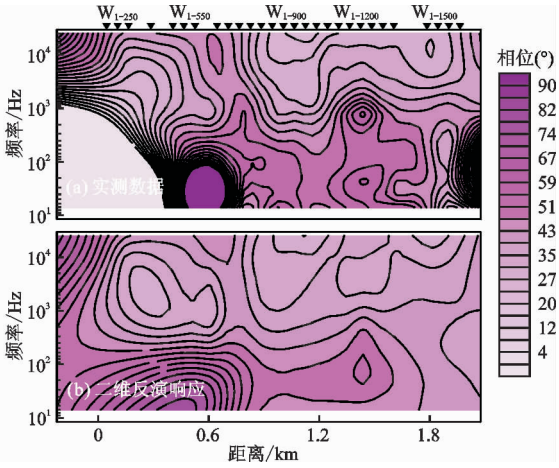


图 4 实测相位与反演响应相位拟断面图

4 AMT 数据的一维及二维反演

4.1 一维反演方法和参数设置

目前 AMT 数据一维反演比较常用的方法有博斯蒂克反演和 Occam 反演，本文采用 Occam 反演对数据进行一维反演。起始模型设置为 18 层的电阻率值为 100 Ω · m 的均匀半空间，最大迭代次数选择为 50 次。反演模型电阻率值上下界限分别设置为 10 000

和 1 Ω·m,最大层厚度设置为 1 000 m,最小层厚度为 10 m。采用批量一维反演模块对所有的站点数据统一进行反演。利用各站点的反演模型对站点 *Y* 方向的距离进行插值,绘制成一维反演电阻率拟断面图和二维反演电阻率模型剖面,如图 5 所示。

4.2　二维反演方法和参数设置

目前 AMT 数据二维反演比较常用的方法有非线性共轭梯度法(NLCG)、RRI 法、Occam 法、基于 Occam 法发展的 REBOCC 法[18]等。本文采用带地形的 2 - D 非线性共轭梯度法(NLCG)算法对旋转到电性主轴方向上的 TM 模式数据进行反演。从图 1 看出,剖面虽然与 NWW 向的覆盖层与基岩的分界线平行,但不同时代的基岩的分界线却是近 EW 走向,这表明岩石基底的构造是近 EW 走向的,所以利用横跨并近似垂直于推断基岩分界线的 AMT 剖面获得电阻率模型可以有效地反映地下的电阻率分布。另外,在数据采集时,采用了电极方向垂直于构造走向、磁探头平行构造走向的数据采集方式,因此,在反演时利用 TM 模式反演,且阻抗旋转角度为 0°。对视电阻率、相位分别设置 15%、5% 误差门限。通过绘制 L 曲线,确定出一个合适的光滑因子 $\tau = 3$。初始模型为 100 Ω·m的均匀半空间。通过 200 次的迭代,得到了 1 个反演结果(见图 5(b)),拟合平方根误差为 0.753 2。拟合曲线和拟断面图如图 2 ~4 所示。可见实测数据和拟合反演模型响应之间具有很高的一致性,证明此次反演模型是可靠的。

4.3　反演模型

比较图 5(a)与图 5(b)可见,这两种电阻率模型之间存在着一定的相似性。具体来讲,在剖面 *Y* 方向距离为 0.6 ~0.8 km 处,均有一条比较显著的近直立的、北倾的低阻条带(C_1)从近地表的位置一直延伸至模型的底部,并可能延伸至更深处;但电阻率值范围却不同,一维反演模型上的范围为 100 ~ 300 Ω·m,而二维反演模型却表现出更低的范围 1 ~10 Ω·m。这个低阻条带 C_1 的位置还与实测数据实电阻率拟断面图(图 3)上面的近直立的、相同位置的低值异常带一致。另外一个相似的特征为两个模型都具有从近地表深度延伸至模型底部的 3 个高阻块体,分别为 R_1、R_2 和 R_3,电阻率值范围为 5 000 ~10 000 Ω·m。除了这些相似性,这两个模型间也存在显著的差别。具体来讲,在二维反演模型的近地表深度存在着一个厚度约为 20 m 的低阻薄层,标记为 CL_1,而一维反演模型却没有。另外,在二维反演模型的 0.6 和 1.4 km 剖面距离处,分别存在着两个“U 型”的低阻体,而一维反演模型上却没有。最后,在二维反演模型最南端的 2 400 ~2 000 m 深度范围,出现了一个低阻体 C_2(30 Ω·m),在一维模型上虽然也有对应的低阻区域,但范围偏小,并且电阻率值也偏低(200 ~300 Ω·m)。

整体上讲,视电阻率拟断面图、一维和二维反演模型之间存在着较大的相似性,证明了电阻率异常,特别是 C_1 的可靠性。但是,很显然二维反演模型中异常的分辨率比视电阻率拟断面图和一维反演结果高得多,也更加适合用于地质解释,二维反演电阻率模型体现的地质信息更加详细。

4.4　反演模型的可靠度测试

通过对二维反演中的电阻率异常与地质构造图进行对比,可发现低阻体 C_1 位于岩性分界面上,而 R_1、R_2 和 R_3 与地表出露的基岩位置具有一致性。因此,它们可能对地质解释具有较为重要的意义。由于浅层的电阻率分布比较复杂,特别是具有若干显著的低阻体。因此,它们的可靠性需要验证。

进行电阻率异常的可靠性验证的方法是将电阻率异常用其周边的背景值替换掉,即近似地将这些异常体移除,构建两个新的验证模型,分别为验证模型 1 和验证模型 2,如图 6(a)所示。

然后分别对新的验证模型进行正演,计算出模型的响应,并与实测数据进行对比,以查看这些异常体是否是确实存在的,结果见图 6(b)。由图 6 可以看出,当移除了近直立低阻条带 C_1 时,3 个测点的模型响应视电阻率曲线的低频部分都出现了显著的降低;而当移除了 R_1、R_2 和 R_3 这 3 个高阻体后,这 3 个站点的视电阻率响应出现了明显的升高。因而这几个异常的移除均能造成模型响应与实测及二维反演模型响应曲线之间的较大偏差。综上所述,这几个异常体是必不可缺的,是真实存在的,并不是反演算法造成的假异常。

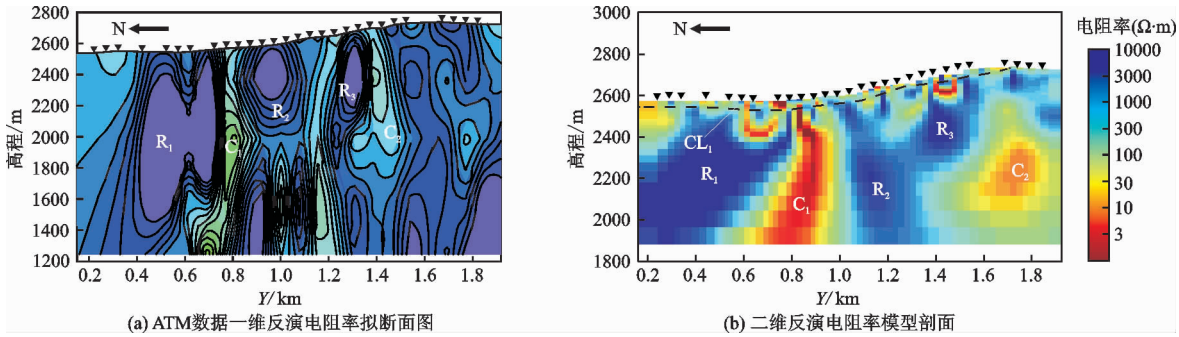
5　二维电阻率模型的地质解释

为了进行更好地地质解释,将地质图和二维反演电阻率模型绘制在一起,形成地质解释综合视图 7。有针对性地对主要的电性异常体进行地质解释如下:

(1)近地表低阻层 CL_1:由图 1 可见,电阻率剖面基本上位于覆盖层内部并近似平行于覆盖层和岩石基底之间的分界线上,因此,电阻率模型中的近地表的低阻薄层 CL_1 推断为覆盖层。由于覆盖层具有较高的孔隙度,并且常富含水等低阻体,因此常表现为较低的电阻率。虽然低阻体的底界面一般情况下

并不可靠,但是区域的钻孔资料表明表覆盖层的厚度约为 20 ~ 40 m,因此推断该低阻层的底界面反映了覆盖层与基岩面之间的分界面的起伏。另外,地势较高的区域,如北段,低阻层较薄,地势较低的区域低阻层较厚,也可以证实上述推断。

(2)高阻块体 R_1、R_2 和 R_3:这 3 个高阻块体均位于元古界念青唐古拉岩群 a 岩组花岗片麻岩的下方。而前寒武纪的变质基底,如花岗片麻岩具有较低的孔隙度和湿度,因此常表现出极高的电阻率[15],因此这 3 个高阻块体符合前寒武纪变质基底的特征。



(a) ATM数据一维反演电阻率拟断面图　　(b) 二维反演电阻率模型剖面

图 5　AMT 数据一维反演电阻率拟断面图与二维反演电阻率模型剖面

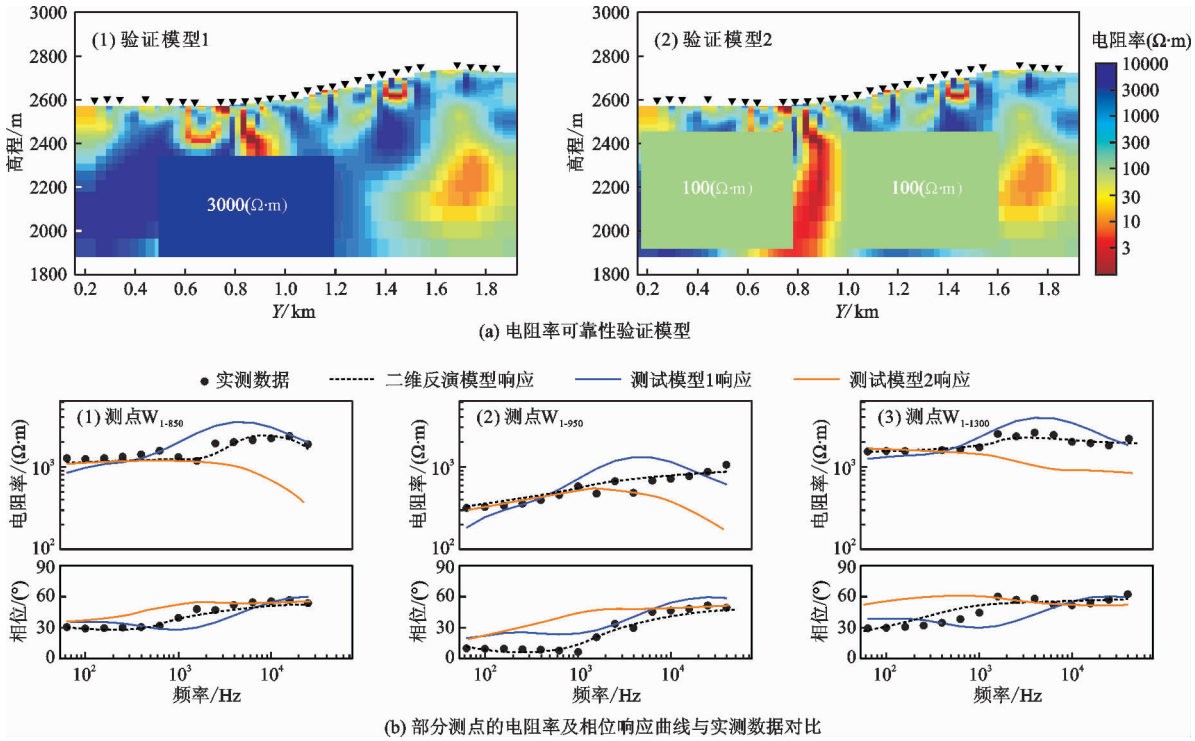


图 6　二维反演模型中电阻率异常的可靠性检验图

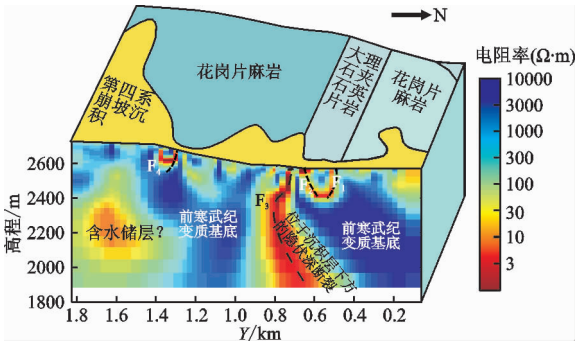


图 7　二维反演模型的地质解释综合视图

(3)近直立、略北倾的低阻条带 C_1:C_1 位于元古界念青唐古拉岩群 a 岩组的花岗片麻岩和大理石加石英片岩之间。这就表明,该位置发生过岩浆、流体的改造和变质作用,而这样的位置常位于基岩内的断裂带处。由于这样的区域在应力挤压作用下,会发生岩石的破裂,造成破碎带。破碎带常由于具有较大的孔隙度而成为流体、石墨和硫化物等低阻物质富集的场所,因此表现出整体的低阻性,被称为断裂带低阻体[19]。可推断这条断裂带为一条深断

裂 F_3,并且具有较高的活动性。

(4)近地表的“U 型”低阻体:除了延伸较深的低阻体 C_1,在近地表的位置还存在 2 条近似“U”型的低阻体。巧合的是,这两个低阻体均位于岩性分界面附近,其上部近直立的部分也体现了断裂的低阻性,但是延伸较浅,为近地表的断裂。而其底部近水平的低阻体,推断为局部含水层,形成于地层分界面附近,并且近直立的浅断裂造成了地表水的渗透,形成了富水层[20]。

(5)南段的低阻体 C_2:该地区位于覆盖层的下方,但没有明显的断裂构造与地表相连,因此可能并非是断裂带低阻体,而是高孔隙度的富水储层。该区域是一个隆起区,而这种背斜构造内部的地层具有较为良好的储水构造,如下方地层水运移通道和浅部盖层,会成为地层水富集的场所。

综上所述,二维反演模型中的电性异常具有较强的地质意义。本研究发现了覆盖层下方的近直立的隐伏断裂层 C_1 和含水储层 C_2。这样的构造往往具有较高的活动性和渗水性,而不利于水利工程的施工和后期的稳定,因此需要避免。另外,高阻体代表的前寒武纪岩石基底却由于孔隙度较小,而表现出较高的结构强度,是水利工程施工建设的理想场所。

6 结　论

本文结合前期地质资料,基于 AMT 数据进一步查明了西藏某水利工程的地质条件,探讨了数据预处理及一维、二维反演和正演模型测试,为水利工程的选址提供了重要的科学依据。取得的主要成果与认识如下:

(1)相比于视电阻率拟断面图、一维反演模型,AMT 的二维反演结果对探测隐伏断层、富水区等不良地质体有很好的应用效果。

(2)通过正演模型可靠度测试,发现的异常体都是不可或缺且具有较高的可靠性,证明了 AMT 在西藏水利工程勘察中具有较强的适用性及可靠性。

(3)初步查明的电性异常部位具有较强的地质意义,可以用来指导水利工程的选址及施工。

参考文献:

[1] 胡清龙,杨 威,苏永军. 大地电磁测深法在水电工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报,2018,15(3):383 – 390.

[2] 郝忠友,楚少义,杨嘉明. EH4 在探测西藏某水电站坝址深厚覆盖层中的应用[J]. 水利规划与设计,2014(2):24 – 26.

[3] 罗 旭,毛 星,魏文博,等. 大地电磁数据三维反演技术在隐伏断裂勘察中的应用:以郯庐断裂宿迁段为例[J]. 现代地质,2016,30(3):587 – 596.

[4] 杨嘉明. 大藤峡水利工程岩溶探测中地球物理方法研究与应用[D]. 长春:吉林大学,2017.

[5] 徐宝林,何乃武,邓小龙,等. 综合物探方法在公路引水隧洞探测中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(2):189 – 191.

[6] 尹 剑,凌 巍. 藏区大地电磁法勘探影响因素分析及对策[J]. 水利规划与设计,2015(11):88 – 90.

[7] 高 天,何国丽,周安昌,等. 基于音频大地测深法研究乌拉嘎断裂[J]. 地球物理学进展,2019, 34(2):545 – 553.

[8] 周琛杰. 高密度电法与 AMT 在断裂构造调查中的综合应用[J]. 工程地球物理学报,2017,14(3):300 – 307.

[9] 王 通,赵安宁,杨天俊. EH4 在大体积不良地质体探测中的应用[C]//中国水力发电工程学会. 中国水力发电工程学会地质及勘探专业委员会中国水利电力物探科技信息网 2012 年学术年会论文集. 贵阳,2012.

[10] 张 巍. EH – 4 电磁测深法在某流域工程勘察中的应用分析[J]. 陕西水利,2019(2):126 – 127.

[11] 陈 斌. 大地电磁测深 TM 模式二维有限差分正演研究[J]. 能源与环境,2016(4):17 + 21.

[12] 万汉平. 大地电磁测深数据 TE 与 TM 极化模式的对比[J]. 世界核地质科学, 2013,30(4): 224 – 230.

[13] 张凯飞. EH – 4 数据在 IMAGEM 与 WINGLINK 下反演处理的对比[J]. 物探与化探,2013, 37(6):1146 – 1151.

[14] 刘 系. 大地电磁二维 CG – OCCAM 反演研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京),2018.

[15] 翁爱华,李斯睿,杨 悦,等. 基于印模法的地面磁电阻率数据三维非线性共轭梯度反演[J]. 地球物理学报,2017,60(5):1903 – 1917.

[16] 周汝峰,王绪本,秦 策,等. 大地电磁 NLCG 与 OCCAM 二维反演的综合利用[J]. 地球物理学进展,2016,31(5):2306 – 2312.

[17] 柳建新,董孝忠,郭荣文,等. 大地电磁测深法勘探——资料处理、反演与解释[M]. 北京:科学出版社,2012.

[18] 李晓昌,钟 清,方 慧,等. 大地电磁测深数据处理技术与反演方法改进及其应用实例[J]. 物探化探计算技术,2017,39(3):313 – 318.

[19] 尹曜田. 利用断裂带电阻率各向异性结构揭示区域构造演化过程的研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.

[20] 何国丽,王光杰,周 超,等. 音频大地电磁法在探测地下水中的应用——以湛江南木水为例[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1):304 – 309.